



SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET

MARKYTESJUNKNING EFTER AVVATTNING

Litteratur- och fältstudier i anslutning till ett område i Emådalen

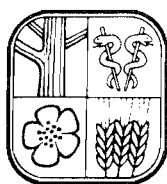
SUBSIDENCE AS A RESULT OF DRAINAGE

Theoretical and practical studies in connection with an area of
the Emå valley

Anders Bjerketorp och Ulf Axelsson

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Rapport 154
Report
UPPSALA 1987
ISSN 0348-1816
ISBN 91-576-3287-1



SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET

MARKYTESJUNKNING EFTER AVVATTNING

Litteratur- och fältstudier i anslutning till ett område i Emådalen

SUBSIDENCE AS A RESULT OF DRAINAGE

Theoretical and practical studies in connection with an area of
the Emå valley

Anders Bjerketorp och Ulf Axelson

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Rapport 154
Report
UPPSALA 1987
ISSN 0348-1816
ISBN 91-576-3287-1

FÖRORD

Under 1980-talet har Avdelningen för lantbrukets hydroteknik ägnat viss uppmärksamhet åt fenomenet markytesjunkning efter avvattning av organogena jordar. M. Sc. Mary McAfee har med stöd av historiskt material studerat markytans sjunkning på Bälinge Mossar ett par mil nordväst om Uppsala och publicerat två uppsatser om sina rön (se litteraturförteckningen i föreliggande rapport).

I slutet av år 1983 tog dåvarande agr. stud. Ulf Axelson upp sjunkningsproblematiken i ett annat geografiskt område med delvis andra jordartsförutsättningar än dem som gäller för Bälinge Mossar. Målsättningen var också en annan än McAfees, nämligen inte att granska vad som hänt, utan att bedöma vad som kommer att hända efter en avvattning. Området ligger i Emådalen invid Lilla Bölö och studierna var avsedda att i viss mån ingå som ett sidoprojekt till det stora, s.k. Emåprojektet.

Efter fältarbeten, laboratorieanalyser och grundliga litteraturstudier utmynnade Axelsons verksamhet i ett examensarbete, som godkändes den 27 december 1984. Arbetets titel var: "Markytesänkning efter avvattning. Litteraturstudier samt egna undersökningar av ett område vid Emån".

Agr. lic. Anders Bjerketorp har, utgående från agronom Axelsons skrift, arbetat vidare med problemet att förhandsberäkna markytesjunkning efter avvattning. Litteraturgenomgången har utvidgats och den teoretiska analysen fördjupats, bl.a. genom införandet av ett nytt sätt att beräkna den kompressionsbetingade markytesjunkningen. Resultatet av Bjerketorps och Axelsons gemensamma mödor föreligger nu under titeln: "Markytesjunkning efter avvattning. Litteratur- och fältstudier i anslutning till ett område i Emådalen".

Tack skall riktas till geolog Hans Gottfrietz och agronom Kerstin Berglund för värdefulla synpunkter under arbetets gång.

Rapporten har, på ett synnerligen förtjänstfullt sätt, överförts till ordbehandlingsmedium av kontorist Maj-Britt Brolin. Figurerna är i de flesta fall utförda av ingenjör Hans Johansson. Båda förtjänar stor uppskattning.

Undersökningen har i allt väsentligt bekostats med medel från försöksavdelningen för hydroteknik och i någon mån från forsknings- och undervisningsavdelningen för lantbrukets hydroteknik. Ett visst bidrag har även lämnats av Lantbruksstyrelsen.

Uppsala i december 1987

Janne Eriksson
Professor

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid.
INLEDNING	1
MARKYTESJUNKNING OCH FORMLER FÖR BERÄKNING AV DENNA	1
- Allmänt om markytesjunkning	1
- Markytesjunkning under svenska förhållanden	3
- Problem betingade av markytesjunkning	6
- Hopsjunkning av jordlagren över grundvattenytan p g a uttorkning m m	8
- Formler för beräkning av hopsjunkning	8
- Sammanpressning (kompression) av jordlagren under grund- vattenytan till följd av grundvattenståndssänkning	9
- Formler för beräkning av markytesjunkning p g a kom- pression	11
- Markytesjunkning på grund av nedbrytning av organiskt ma- terial	14
- Formler för beräkning av markytesjunkning förorsakad av nedbrytning	14
- Total markytesjunkning	16
- Formler för direkt beräkning av total markytesjunkning	16
EXPERIMENTELLA UNDERSÖKNINGAR INOM LILLA BÖLÖ-OMRÅDET. NÅGRA ODLINGSEGENSKAPER HOS OMRÅDETS JORDAR SAMT BERÄKNING AV DEN MARKYTESJUNKNING SOM FÖLJER PÅ EN GRUNDVATTENSTÅNDSSÄNKNING	20
- Allmän presentation av Emåprojektet samt av undersöknings- området vid Lilla Bölö	20
- Material och metoder	21
- Fältarbete	21
- Laboratoriearbete	23
- Metodik för markytesjunksberäkningar	24
- Beräkningar och resultat	25
- Hopsjunksberäkningar	28
- Kompressionsberäkningar	30
- Total markytesjunkning	34
DISKUSSION	35
SAMMANFATTNING	38
SUMMARY	42
LITTERATURFÖRTECKNING	46
BILAGA	49

INLEDNING

För att ett modernt, rationellt jordbruk skall kunna bedrivas krävs att åkermarken kan avvattnas effektivt. Detta gäller inte minst organogena jordar, vilka ofta är lågt belägna i terrängen. Efter dränering av dessa jordar kan vissa problem uppstå, som till exempel markytesjunkning och lågt pH-värde. Syftet med föreliggande arbete är att försöka belysa ett av dessa problem, nämligen markytesjunkningen.

Det område inom vilket undersökningens experimentella del utförts ligger vid Lilla Bölö, Ryningsnäs vid Emån i Småland och ingår i ett större projekt med invallningar och torrläggningar längs Emån, det s k Emåprojektet. Resultaten från undersökningen skall bland annat användas som underlag för bedömning av båtnaden (nyttan) för Lilla Bölö-området av det planerade torrlägningsföretaget.

Arbetets huvudinriktning är att finna metoder för en ungefärlig uppskattning av markytesjunkningens storlek efter torrläggning av det aktuella området. Formler publicerade på olika håll i världen har använts. Arbetet är indelat i två huvuddelar

Del 1: Litteraturstudie. Markytesjunkning och formler för beräkning av denna

Del 2: Experimentella undersökningar inom Lilla Bölö-området. Några odlingssegenskaper hos områdets jordar samt beräkning av den markytesjunkning som följer på en permanent grundvattenståndssänkning.

I uppsatsen redovisas markytesjunksberäkningar, jordartsförhållanden, avvägningsresultat, djup till fast botten, markfysikaliska data samt resultat från pH-mätningar och svavelanalys.

MARKYTESJUNKNING OCH FORMLER FÖR BERÄKNING AV DENNA

Allmänt om markytesjunkning

Det är sedan gammalt väl känt att avvattning och brukning av torvjordar leder till en sjunkning av markytan. Denna markytesjunkning kan i stort sett återföras på tre delkomponenter, var och en bestämd av sin särskilda process:

1. Sammanpressning (kompression) av jordlager under den nya grundvattenytan
2. Hopsjunkning av jordlager över grundvattenytan till följd av sättning, krympning och förtätning
3. Nedbrytning av det organiska materialet (torvsvinn; "bortodling")

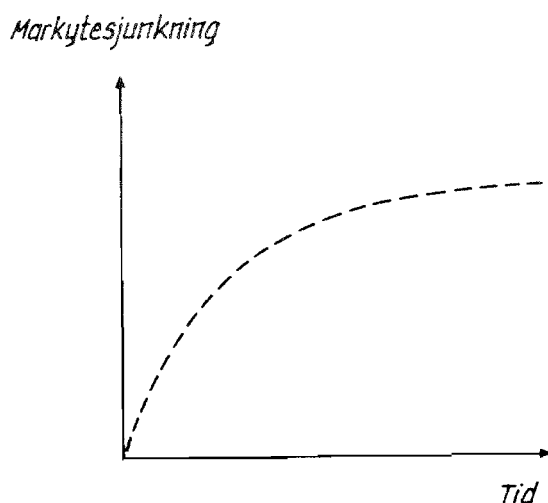
Ett bidrag till den sammanlagda markytesjunkningen lämnas härutöver av den packning som förorsakas av de allt tyngre maskinerna i jordbruket. Även vind- och vattenerosion kan resultera i en viss sjunkning.

Markytesjunkningens storlek påverkas av flera faktorer, av vilka följande kan nämnas:

- Ytsjunkningen ökar i princip med ökat dräneringsdjup (Se bl a Osvald, 1937; Schothorst, 1976, 1982; Hovde, 1979)
- Ju större porvolymen är, desto större blir ytsjunkningen vid i övrigt lika förhållanden (Berglund, 1982)
- Större torvdjup ger större absolut ytsjunkning (Se bl a Stenberg 1936; Agerberg 1961; Hovde, 1979; McAfee, 1985a))
- Växtslag och bruksintensitet påverkar ytsjunkningens storlek. Öppen växtodling ger långsiktigt en större sänkning än vallodling.

Kompressionen och hopsjunkningen är störst de första åren efter en dikning (Ilnicki, 1977; Ilnicki & Kuntze, 1977; Hovde, 1979; Berglund, 1982; Schothorst, 1982). Figur 1 visar en principskiss av tidsberoendet av hopsjunkningens och sammanpressningens summa (Eggelsmann, 1973, 1978). Enligt en holländsk undersökning (Schothorst, 1982) skedde 70 % av sjunkningen under de tre första åren efter dikningens utförande.

Till skillnad mot hopsjunkningen och sammanpressningen är nedbrytningen en process som inte är karakteristiskt avtagande med tiden. Den fortgår så länge nedbrytbart material finns tillgängligt och så länge syrehalt, pH-värde och temperatur tillåter biokemiska aktiviteter (Stephens & Stewart, 1977).



Figur 1. Hopsjunkningens och sammanpressningens tidsberoende. Markytesjunkningens summationskurva (efter Eggelsmann, 1973, 1978).
Time dependence of shrinkage and consolidation. Cumulative subsidence (after Eggelsmann, 1973, 1978).

Vilken process som i det enskilda fallet har störst betydelse för markytesjunkningen beror till stor del på inom vilket klimatområde torvjorden är belägen. Såsom exempel kan nämnas att sammanpressningen under grundvattenytan inom subtropiska områden är liten (Segeren & Smits, 1974). Detta beror på att torvjordarna där på grund av upprepade låga grundvattenstånd i samband med torrperioder i det förflutna redan i väsentlig utsträckning är konsoliderade. Nedbrytningen har däremot stor betydelse inom denna klimatzon. Detta sammanhänger dels med att nedbrytningen ökar med temperaturen, dels med att den mikrobiella aktiviteten i de subtropiska torvjordarna gynnas av att dessa har höga pH-värden (6,0–7,5) och god näringstillgång.

Markytesjunkning under svenska förhållanden

Den så kallade primära markytesjunkningen (den hopsjunkning och den sammanpressning som är direkt beroende av grundvattensänkningen och som sker de första åren efter en dränering) kan under svenska förhållanden vara betydande. Ytsjunkningen på Gisselåsmyn i Jämtland från torrläggningen år 1922 till år 1932 undersöktes av Stenberg (1936). Medeldjupet hos myren hade under denna period minskat från 1,75 m till 1,46 m, dvs 0,29 m. Markytesjunkningen varierade med torvdjupet enligt tabell 1.

Tabell 1. Den årliga och den summerade ytsjunkningen (cm) 1922–1932 på Gisselåsmyn inom olika torvdjupsintervall (efter Osvald, 1937)
Annual and cumulative subsidence (1922–1932) in cm within various peat depth classes on Gisselåsmyn (after Osvald, 1937)

Torvdjups- intervall (m)	Uppmätt ytsjunkning (cm)	
	per år	summerat
0 – 0,5	1,4	14
0,5 – 1,0	2,0	20
1,0 – 1,5	2,4	24
1,5 – 2,0	2,7	27
2,0 – 2,5	3,3	33
2,5 – 3,0	3,8	38
> 3,0	4,1	41

Att torvdjupet har en avgörande betydelse framgår även av en mätserie från ett invallat område vid Frändesta, Helgesta socken, Södermanlands län (Agerberg, 1961). Området dikades 1936 och markytesjunkningen fram till år 1960 framgår av tabell 2.

Tabell 2. Den årliga och den summerade ytsjunkningen (cm) 1936-1960 på ett invallat område vid Frändesta, uppdelat på grund, måttligt djup och djup myr (efter Agerberg, 1961)

Annual and cumulative subsidence (1936-1960) in cm of shallow, moderately deep and deep peat in an embanked area near Frändesta (after Agerberg, 1961)

	Uppmätt ytsjunkning (cm)			
	1936-1945		1945-1960	
	per år	summerat	per år	summerat
Randområde, grund myr	0,76	6,8	0,47	7,0
Mellanområde, måttligt djup myr	2,33	21,0	1,31	19,7
Centrala delen, djup myr	4,97	44,7	1,92	28,8

Även försöksresultat som belyser bruksintensitetens inverkan på markytsjunkningens hastighet refereras i Agerberg (1961). Där anges att det på Statens försöksgård Flahult utanför Jönköping för perioden 1901-1950 uppmättes en markytsjunkning av i genomsnitt 1,78 cm/år på en intensivt brukad åker (torvdjup 1901: 2,0 m) och likaså i genomsnitt 0,93 cm/år på en betesvall (initialt torvdjup: 2,7 m).

På ett av Lantbruksuniversitetets försöksfält på en högmosse vid Lidhult, i Reftete socken, Jönköpings län, har mätningar utförts som medger att markytsjunkningen kan anges, dels i förhållande till initialt torvdjup, och dels i relation till odlingsintensiteten, såsom framgår av tabell 3 (K. Berglund, 1987, muntl. medd.).

Tabell 3. Markytsjunkningen (cm/år) 1950-1976 på ett myrområde vid Lidhult, uppdelad efter initiala torvdjupsintervall samt bruksinriktning (öppen odling eller vallodling)

Subsidence (1950-1976) in cm/year attributed to initial peat depth class and land use (open cultivation or pasture) on a peat area near Lidhult

Initiala torv- djupsintervall (m)	Markytsjunkning 1950-1976 (cm/år) vid	
	öppen odling	vallodling
1,5 - 2,5	1,7	-
2,5 - 3,5	2,7	1,8
3,5 - 4,0	3,3	2,7

I ett tidigare arbete av Agerberg (Agerberg, 1956) redogöres för markytsjunkningen 1922-1950 på Statens försöksgård Brännberg, belägen cirka 3 mil västsydväst om Boden. Sedan myrmarkerna där uppodlats vid 1920-talets början inträdde en markytsjunkning som för perioden 1922-1928 uppmättes till i medeltal 2,81 cm/år. Sjunkningen 1928-1935 var 1,63 cm/år och sjunkningen 1935-1950 uppgick till 1,11 cm/år. Torvdjupet 1922 var i genomsnitt 2,2 m.

1984-1985 genomförde M. McAfee en inventering av markytesjunkningen på tre delområden inom myrkomplexet Bälunge Mossar ett par mil nordväst om Uppsala. Studierna gällde förändringar under tidsavsnittet 1908-1984 (tidsavsnittet 1904-1984 för ett delområde, betecknat A). Resultaten av undersökningarna är redovisade i McAfee (1985a, 1985b).

En lätt bearbetning av de i McAfee (1985a) rapporterade mätvärdena ger vid handen att markytesjunkningen som medeltal från 70 mätpunkter, fördelade på tre delområden, var 1,7 cm/år under åren 1908(1904)-1984. Antalet mätpunkter var 8, 30 och 32 inom delområdena A, B resp. C. Av tabell 4 framgår hur storleken av den årliga markytesjunkningen varierar med delområden och delperioder. Områdena har under årens lopp omväxlande utnyttjats för öppen odling och för vallodling (slåttervall och betesvall). Sett i ett långt tidsperspektiv har vallodlingens andel varit stor.

Med material från sammanlagt 30 mätpunkter redogör McAfee (1985a) vidare för hur markytesjunkningens storlek 1908(1904)-1984 sammanhänger med torvlagrets initiala mäktighet. En regressionsberäkning med utnyttjande av de rapporterade uppgifterna visar att markytesjunkningen, S_s , såsom funktion av det initiala torvdjupet, d_t , kan approximeras med det enkla uttrycket $S_s = 0,01 \cdot (d_t - 0,1) \cdot N$, där N är antalet år (76 eller 80) som gått sedan torrläggningen vid seklets början samt där S_s och d_t förutsättes vara i meter. Den årliga markytesjunkningen är följaktligen $100 S_s/N$ centimeter.

Tabell 4. Årliga markytesjunkningar (cm) på Bälunge Mossar 1908(1904)-1984, alltefter delområden och tidsavsnitt. Bearbetning av data hämtade från McAfee (1985a)

Annual subsidence (cm) on Bälunge peat according to site and time period. Recalculated data from McAfee (1985a)

Tidsavsnitt	Delområde			Medeltal av A, B och C
	A	B	C	
1908(1904) - 1938	2,3	1,9	1,7	1,85
1938 - 1964	1,9	1,5	1,8	1,7
1964 - 1984	1,9	1,6	1,1	1,4
<hr/>				
Medeltal				
1908(1904) - 1984	2,0	1,7	1,6	1,7

Utöver det axplock bland svenska undersökningsresultat som här refererats skall slutligen en illustrativ norsk studie omnämnas. På försöksgården Moldstad på ön Smöla cirka 12 mil väster om Trondheim har O. Hovde (Hovde, 1979) uppmätt en markytesjunkning av upp till drygt 10 cm/år under de första fem åren efter en myrdikning, med ett initialt torvdjup av cirka

4,0 m inom det aktuella myrpartiet. Såsom jämförelse kan nämnas att Berglund m fl (1980) rapporterar en markytesjunkning i närheten av dikena på det tidigare omnämnda (s. 4) försöksfältet vid Lidhult av hela 20 cm under det första året efter torrläggningen.

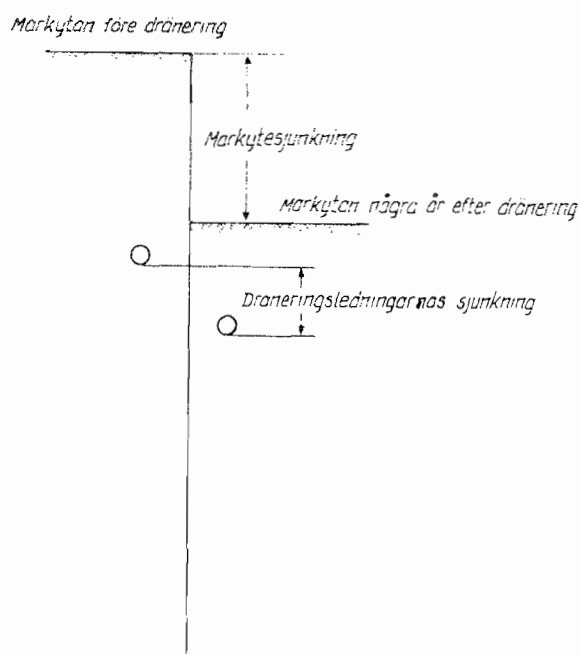
Det kan inte nog starkt understrykas att det är mycket svårt att jämföra olika försöksresultat med varandra, eftersom det är så många olika faktorer som inverkar på ytsjunkningsförloppen.

Problem betingade av markytesjunkning

På täckdikad myrmark medför hopsjunkningen och torvsvinnet ("bortodlingen") att djupet till dräneringsrören minskar. Även om dräneringsledningarna i och för sig också sjunker, så sjunker de inte lika mycket som markytan gör (jfr fig. 2).

Såsom exempel på minskning av dräneringsdjupet kan anföras att på försöksområdet vid Lidhult hade det ursprungliga dikesdjupet 1,1 m (1950) efter 26 år (1976) minskat till omkring 0,6 m (Berglund m fl, 1980).

Dräneringsledningarnas sjunkning kan variera mellan olika delar av ett fält, eftersom den är beroende av bl a torvdjup och torvslag, parametrar som brukar vara ganska växlande, rumsligt sett. Denna variation kan leda till att somliga avsnitt av en täckt ledning sjunker mer än andra, vilket många gånger medför att det uppstår bakfall i vissa delar av ledningen.



Figur 2. Markytans och dräneringsledningarnas sjunkning efter dränering av myrmark (efter Eggelsmann, 1973, 1978).

Subsidence of the soil surface and of drainage pipes after drainage of peat soil (after Eggelsmann, 1973, 1978).

Vid etablering av täckta ledningar på torvjordar måste alltså hänsyn tas till hopsjunkningen. Rören måste läggas med en viss marginal för framtida hopsjunkning. Enligt Eggelsmann (1973, 1978) kan en viss procent, alltefter torvens täthet, adderas till det önskade djupet vid bestämning av det initiala läggningsdjupet (se tabell 5).

Tabell 5. Procentuella ökningar, alltefter olika torvkonsistens, av grävdjupet utöver önskat dräneringslutdjup (efter Eggelsmann, 1973, 1978)
Percentage increase in drain installation depth required on peats of different consistencies to achieve a desired drain depth (after Eggelsmann, 1973, 1978)

Torvens konsistens	Dräneringsdjup efter ytsjunkning (m)					
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
Nästan flytande	ej täckdikning					
Lucker	31	38	45	51	58	65
Ganska lucker	21	26	30	34	38	42
Ganska fast	15	17	20	23	25	28
Fast	10	12	14	16	18	20

Måste en dränering fördjupas medför detta ofta att också huvudavloppet måste fördjupas. Eftersom organogena jordar vanligtvis är belägna i lågt liggande områden i terrängen kan en fördjupning av avloppet bli både dyr och besvärlig. Om det aktuella området gränsar till sjö eller vattendrag, vilket är vanligt, kan invallning och pumpning vara den enda möjliga lösningen.

Emedan torvjorden i många fall endast har måttligt djup, har det stor betydelse vilken jordart som underlagrar torven. Om underliggande lager består av morän kan torvsvinnet ("bortodlingen") leda till att området endast kan användas som betesvall eller rent av måste tas ur odling. Vanligt är att torven underlagras av svavelhaltiga gyttjejordar. Vid torrläggning och luftning av dessa oxideras svavlet till svavelsyra, och problem med lågt pH kan uppstå. Det kan emellertid också förekomma att torven underlagras av lera eller sand, vilka inblandade i torven kan ge upphov till en mycket bra åkerjord.

Eftersom dränering av myrmarker leder till en markhopsjunkning och i och med det till en minskning av dräneringsdjupet, kan ett slags verkningsgrad för dräneringen beräknas (Haefeli & Shaad, 1944). Om grundvattenytan initialt sänks med ett absolut belopp, a_1 , kommer efter hopsjunkningen ett annat belopp, b_1 , att gälla för den effektiva grundvattensänkningen ($b_1 < a_1$). Ju större hopsjunkningen är i förhållande till den ursprungliga grundvattensänkningen, desto mindre blir kvoten b_1/a_1 . Det vill säga att om markytesjunkningen är lika stor som grundvattensänkningen så blir b_1 och därmed kvoten b_1/a_1 lika med noll, vilket betyder att dräneringens verkningsgrad då är noll.

Hopsjunkning av jordlagren över grundvattenytan p g a uttorkning m m

Hopsjunkningen av jordlagren ovanför grundvattenytan är betingad av tre delförlopp, nämligen för det första av en tämligen snabb sättning (initialsättning) efter grundvattenståndssänkningen, för det andra av en krympning förorsakad i främsta rummet av uttorkning samt för det tredje av en densitetsförhöjning eller förtätning åstadkommen genom biologisk-kemisk omvandling.

Initialsättningen och - i stort sett - krympningen är fysikaliska processer orsakade av kapillära undertryck, uppkomna av att grundvattenståndets sänkning och evapotranspirationens verkningar leder till sammandragningar i markskelettet. Porer som tidigare varit fyllda med vatten eller luft faller ihop, vilket leder till en minskning av porvolymen (Segeren & Smits, 1974). Eftersom organogena jordar har svagare markskelett än vad mineraljordar har, så reagerar organogena jordar med större initialsättning och krympning än mineraljordar.

De kapillära krafterna kan i nedre delen av rotzonen uppnå ett negativt tryck av 150 meter vattenpelare (vissningsgränsen) och i de översta 20 centimetrarna av marken nå mycket stora värden (tusentals meter vattenpelare).

En viss del av krympningen sker i samspel mellan biologisk-kemisk omvandling och fysikalisk påverkan.

Vertikal krympning ger en primär hopsjunkning. Horisontell krympning leder till sprickbildning (Segeren & Smits, 1974). Så småningom faller de utbildade sprickorna ihop och/eller fylles med jordpartiklar, ett skeende som i sin tur medför ytterligare sjunkning, en sekundär hopsjunkning.

Förtätningen är en biologisk-kemisk process, ej alltid så lätt att skilja från den del av krympningen som inte är rent fysikaliskt genererad.

Formler för beräkning av hopsjunkning

För empiriska beräkningar av hopsjunkningen finns flera metoder redovisade i litteraturen. Enligt de Glopper (1972) är hopsjunkningen hos mineraljordar linjärt proportionell mot minskningen av torr skrymvolymitet, v .

$$v_1/v_2 = d_1/d_2 \quad (1)$$

- v_1 : Torr skrymvolymitet (i ostörd lagring) före grundvattensänkning (m^3/kg)
- v_2 : Torr skrymvolymitet (i ostörd lagring) sedan jämvikt inträtt efter grundvattensänkning (m^3/kg)
- d_1 : Tjocklek av jordlager före grundvattensänkning (m)
- d_2 : Tjocklek av jordlager sedan jämvikt inträtt efter grundvattensänkning (m)

Formeln (1) går också att använda på organiska jordar med 10-30 % organiskt material, men istället för torr skrymvolymitet, v , används då torr skrymvolymitet hos mineraldelen, v_M . Detta är nödvändigt på grund av den organiska delens instabilitet. För att man för ett visst område skall kunna uppskatta den slutligen resulterande torra skrymvolymiteten (v eller v_M) efter en grundvattensänkning, så krävs det att man kan jämföra med ett likartat område där den slutgiltiga hopsjunkningen kan anses vara uppnådd. Det kan emellertid i praktiken vara svårt att hitta ett sådant jämförelseområde.

Schothorst (1982) redovisar en formel som gäller för homogena torvjordar utan fluvial eller marin påverkan. Med formeln kan beräknas hur stor del av en konstaterad (OBS!) markytesjunkning som beror av hopsjunkningen. Eftersom hopsjunkningen till största delen bestäms av den organogena substansens egenskaper utgår man från torr skrymdensitet hos det organiska materialet, dels det opåverkade under grundvattenytan och dels det av hopsjunkningen påverkade mellan gamla och nya grundvattenytan. Torr skrymdensitet hos det organiska materialet fås genom att man först beräknar torr skrymdensitet hos hela jordprovet och sedan multiplicerar med volymprocent organisk substans samt dividerar med 100. Schothorsts formel har följande utseende:

$$S_h = d \cdot (\rho_{H,1} / \rho_{H,2} - 1) \quad (2)$$

S_h :	Markytesjunkning p g a hopsjunkning	(m)
d :	Tjocklek av jordlager	(m)
$\rho_{H,1}$:	Torr skrymdensitet hos det organiska materialet mellan gamla och nya grundvattenytan	(kg/m ³)
$\rho_{H,2}$:	Torr skrymdensitet hos det organiska materialet strax under den nya grundvattenytan	(kg/m ³)

Enligt de Glopper (1972) torde formel (14a), Segebergs formel, vilken ursprungligen var avsedd för beräkning av total markytesjunkning, med fördel kunna appliceras på problemet att skatta storleken av myrjordars hopsjunkning ovanför en sänkt grundvattenyta (jfr s. 18-19).

Sammanpressning (kompression) av jordlagren under grundvattenytan till följd av grundvattenståndssänkning

Komprimering av jordlagren under grundvattenytan är en mekanisk process som beror på en ökning av överliggande lagers tryck på djupare skikt när grundvattenytan sänks. Totaltrycket, σ , på ett givet jordlager är sammansatt av porvattentrycket, μ , och effektivtrycket, $\bar{\sigma}$, (Broms, 1981).

$$\sigma = \mu + \bar{\sigma} \quad (3a)$$

σ : Totaltryck (Pa)
 μ : Porvattentryck (Pa)
 $\bar{\sigma}$: Effektivtryck (Pa)

Vilket efter omflyttning ger

$$\bar{\sigma} = \sigma - \mu \quad (3b)$$

Totaltrycket är $\sigma = \rho_m \cdot d \cdot g \quad (4)$

σ : Totaltryck (Pa)
 ρ_m : Vattenmättad skrymdensitet (kg/m^3)
 d : Det aktuella jordlagrets tjocklek (m)
 g : Accelerationen vid fritt fall ($=9,82 \text{ m/s}^2$)

och porvattentrycket är

$$\mu = \rho_w \cdot d_w \cdot g \quad (5)$$

ρ_w : Vattnets densitet (kg/m^3)
 d_w : Det aktuella vattenlagrets tjocklek (m)

Insättning av (4) och (5) i formel (3b) ger effektivtrycket

$$\bar{\sigma} = \rho_m \cdot d \cdot g - \rho_w \cdot d_w \cdot g \quad (6')$$

men eftersom $d_w = d$ kan detta skrivas (efter KTH exempelsamling)

$$\bar{\sigma} = (\rho_m - \rho_w) \cdot d \cdot g \quad (6)$$

Förutsatt att jorden ovanför grundvattenytan fortfarande är vattenmättad kapillärt, vilket vid måttlig grundvattenståndssänkning kan anses vara fallet i de flesta marker som inte varit avvattnade tidigare (Smedema & Rycroft, 1983), innebär det av ekvation (6) givna sambandet, att om grundvattenytan sänks d meter blir effektivtrycket som överförs till jordlager under djupet d

$$\bar{\sigma} = (\rho_m - 0) \cdot d \cdot g = \rho_m \cdot d \cdot g \quad (\text{Pa})$$

istället för

$$\bar{\sigma} = (\rho_m - 1000) \cdot d \cdot g \quad (\text{Pa}),$$

vilket innebär att effektivtrycket ökar med $1000 \cdot d \cdot g$ Pa.

För varje meter som grundvattenytan sänks ökar alltså effektivtrycket på underliggande lager med 9820 Pa (1000 kp/m^2). Med andra ord, en sänkning av grundvattenytan har till effekt att belastningen på jorden ökar med ett belopp som motsvarar det tryck som ett vattenlager med en tjocklek lika med grundvattenytans sänkning skulle utöva (Segeren & Smits, 1974).

En ökning av effektivtrycket kommer att innebära en komprimering av jordlager under grundvattenytan. Effektivtrycket är nämligen av avgörande betydelse för jordmaterialets hållfasthet, och ändringar av effektivtrycket påverkar jordmaterialets deformation och de kompressioner som erhålls vid belastningen (Broms, 1981).

På grund av de organogena jordarnas låga volymvikt kommer ökningen av effektivtrycket till följd av en grundvattenståndssänkning att relativt sett bli större på dessa jordar än vad som är fallet på en mineraljord vid en lika stor grundvattensänkning (Segeren & Smits, 1974).

Formler för beräkning av markytesjunkning p g a kompression

För beräkning av den markytesjunkning som förorsakas av kompression kan, enligt de Glopper (1972), Terzaghis formel för inneslutna jordlagers kompression användas (jfr Terzaghi & Peck, 1948):

$$S_k = d/c \ln(\bar{\sigma}_2/\bar{\sigma}_1) \quad (7a)$$

S_k :	Markytesjunkning p g a kompression	(m)
d :	Tjocklek av kompressibelt jordlager	(m)
c :	Kompressionskoefficient	(-)
$\bar{\sigma}_2$:	Effektivtryck efter grundvattensänkning	(Pa)
$\bar{\sigma}_1$:	Effektivtryck före grundvattensänkning	(Pa)

Totaltrycket (= det kumulerade totaltrycket) på ett djupare liggande (tunt) jordskikt är lika med summan av produkterna av de överliggande lagrens vattenmättade skrymdensitet och tjocklek multiplicerad med accelerationen vid fritt fall, g .

För att effektivtrycket före grundvattenståndssänkningen skall erhållas, så måste porvattentrycket subtraheras från totaltrycket enligt formel (3b). Om mätvärden på porvattentrycket saknas, så kan detta tryck i enlighet med de Glopper (1972), för ett jordlager med tjockleken d , skattas till $d \cdot 1000 \text{ g}$, där 1000 står för vattnets densitet i kg/m^3 . Ett under grundvattenytan beläget jordlager av exempelvis 1,2 m tjocklek utövar alltså ett effektivtryck på sitt underlag av $1,2 \cdot (\rho_m - 1000) \cdot g \text{ Pa}$.

Effektivtrycket efter grundvattensänkningen är lika med effektivtrycket före sänkningen plus det extra tryck, $d \cdot 1000 \cdot g$, vilket, efter vad som tidigare anförts, uppstår genom sänkning av grundvattenytan. Sammanhanget kan uttryckas med följande formel:

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_1 + d \cdot \rho_w \cdot g \quad (8)$$

Kompressionskoefficienten, c , kan bestämmas på laboratorium genom analys av prover, men kan också skattas med hjälp av tabellerna 6a, 6b och 7.

Tabell 6a. Överslagsvärden på kompressionskoefficienten, c , för myrjordar av olika konsistens enligt undersökningsresultat från skilda länder (efter de Glopper, 1972)

Reference values of the coefficient of compression, c , on peats of different consistencies. Based on experimental results from several countries (after de Glopper, 1972)

Land	Koeff. c när myrjorden är					kompakt
	mycket lucker	lucker	ganska lucker	ganska fast	fast	
Holland	2	3		5		
Jamaica		4-5		6-8		
Grekland			7-8		12	20-35

Tabell 6b. Överslagsvärden på kompressionskoefficienten, c , för okonsoliderade lerjordar med olika lerhalter och olika mätnadsvattenhalter (efter de Glopper, 1972)

Reference values of the coefficient of compression, c , on unconsolidated clays with varying clay contents and moisture contents at saturation (after de Glopper, 1972)

Land	Lerhalt (vikts-%)	Vattenhalt vid vattenmättnad, $w_{1,m}$ (vikts-%)		Kompressionskoefficienten, c
Holland	10	40		9,5
	20	60		8
	30	80		7
	40	100		6
	50	120		5

Tabell 7. Överslagsvärden på kompressionskoefficienten, c , för några jordar med angivna värden på kompaktdensitet, porvolym och torr skrymdensitet (efter Smedema & Rycroft, 1983)

Reference values of the coefficient of compression, c , for soils with given values of density of solids, porosity and dry bulk density (after Smedema & Rycroft, 1983)

Jord	Kompakt- densitet (kg/m ³)	Porvolym (%)	Torr skrym- densitet (kg/m ³)	c
Sandjord (<i>Sand</i>):				
löst packad	2650	45	1450	100
hårt packad	2650	40	1600	150
Moig lättlera (<i>Loam</i>): i.dr.				
	2650	50	1300	25
Lera (<i>Clay</i>):				
i.dr.	2650	60	1000	20
odr.	2650	80	500	8-10
Gyttjehaltig jord (<i>Peaty clay</i>):				
e.dr.	2000	60	800	6- 8
Torv (<i>Peat</i>): i.dr.	1400-1600	80-90	150-300	4- 5

i.dr. = intensivt dränerad (konsoliderad)

e.dr. = extensivt dränerad (halvkonsoliderad)

odr. = odränerad (okonsoliderad)

Även om formel (7a) kan anses användbar bör man enligt de Glopper (1972) uppmärksamma att den har vissa begränsningar. En anledning till dessa begränsningar är att kvoten mellan $\bar{\sigma}_2$ och $\bar{\sigma}_1$ blir relativt liten i och med att vattenytan endast sänks 1,0-1,5 m. Dessutom varierar grundvattenytan med årstiden. För att man skall vara på den säkra sidan bör den lägsta årsnivån på grundvattenytan användas. Bestämningen av kompressionskoefficienten kan också utgöra en osäkerhetsfaktor. Segeren & Smits (1974) anger ytterligare några begränsningar, nämligen att hastigheten av belastningsökningen är av betydelse för kompressionskoefficientens storlek och dessutom att kompression är möjlig endast om vatten kan pressas ut ur jordlagren.

Markytesjunkning på grund av nedbrytning av organiskt material

Nedbrytningen av det organiska materialet bidrar också till markytesjunkningen. Fenomenet kallas torvsvinn eller "bortodling". Processen är både kemisk och biokemisk. Enligt Kuntze (1976) är nedbrytningen beroende av:

1. tillgänglig syremängd
2. jordens pH-värde
3. aktuell kol/kväve-kvot
4. klimatet

De tre första faktorerna påverkas av hur jorden brukas. Mängden luft i jorden är beroende av dräneringsintensiteten; intensivare dränering ger mindre vatten och mer luft. Också jordbearbetning luftar jorden. Enligt Kuntze (1976) är förlusten av organiskt material på grund av nedbrytning dubbelt så stor vid öppen växtodling som vid vallodling.

En annan faktor som ger snabbare nedbrytning är högt pH-värde, vilket sammanhänger med att mikrobiotivet då är rikare.

En låg kol/kväve-kvot medför en snabbare nedbrytningsprocess. Ju mer kväve och kalk som tillförs jorden, desto snabbare går alltså nedbrytningen av det organiska materialet.

Formler för beräkning av markytesjunkning förorsakad av nedbrytning

I varmt klimat svarar nedbrytningen för en stor del av den sammanlagda markytesjunkningen. Stephens & Stewart (1977) redogör för en metod att beräkna ytsjunkningens beroende av temperaturen. Metoden bygger på att reaktionshastigheten hos biokemiska aktiviteter ungefär fördubblas vid en höjning av temperaturen med tio grader.

$$S_n = (a_2 + b_2 \cdot z_d) \cdot Q_{10}^{(\bar{T} - T_n)/10} \quad (9)$$

S_n : Markytesjunkning i m/år förorsakad av nedbrytning

a_2 : Konstant (= -0,1035)

b_2 : Koefficient (= 0,0169)

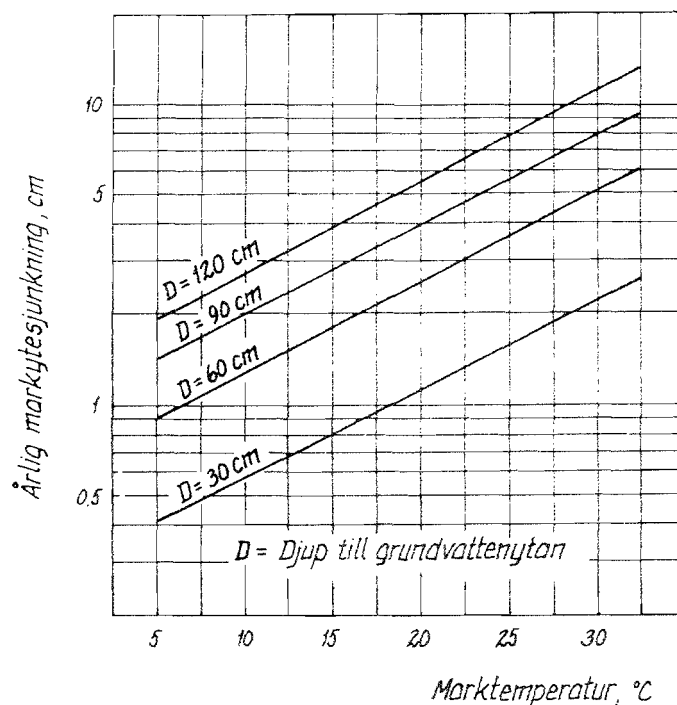
z_d : Dräneringsdjup (m)

Q_{10} : Bas för exponentialfunktion (=2)

\bar{T} : Medeltemperatur under året ($^{\circ}\text{C}$)

T_n : Den lägsta temperatur vid vilken oxidation äger rum (ung. 5°C)

Av figur 3 framgår hur stor den årliga markytesjunkningen genom nedbrytning är vid olika djup till grundvattenytan och olika marktemperaturer.



Figur 3. Den årliga av nedbrytning förorsakade ytsjunkningen, given som funktion av grundvattenytans djupläge och markens temperatur (efter Stephens & Stewart, 1977).

Annual subsidence due to mineralization as a function of groundwater level and soil temperature (after Stephens & Stewart, 1977).

Den markytesjunkning som beror av nedbrytningen kan enligt Schothorst (1982) i efterhand beräknas med hjälp av torra skrymdensiteterna hos mineraldelen i lagren över resp. under grundvattenytan. Vid nedbrytning förblir mängden mineralogent material densamma, men skrymdensiteten ändras. Med formel (10) beräknas markytesjunkningens beroende såväl av nedbrytning som av hopsjunkning. Torr skrymdensitet hos mineraldelen fås genom att man först beräknar torr skrymdensitet hos hela jordprovet och sedan multiplicerar med volymprocent mineralogent material samt dividerar med 100 (jfr s. 9).

$$S_{hn} = d \cdot (S_{M,1} / S_{M,2} - 1) \quad (10)$$

- S_{hn} : Markytesjunkning p g a hopsjunkning och nedbrytning (m)
 $S_{M,1}$: Torr skrymdensitet hos mineraldelen i jorden mellan gamla och nya grundvattenytan (kg/m³)
 $S_{M,2}$: Torr skrymdensitet hos mineraldelen i jorden strax under grundvattenytan (kg/m³)
 d : Tjocklek av jordlager (m)

S_{hn} är alltså sammansatt av en hopsjunknings- och en nedbrytningskomponent,

$$\text{dvs} \quad S_{hn} = S_h + S_n$$

Hopsjunkningskomponenten kan beräknas med formel (2). Nedbrytningskomponenten erhålles genom en algebraisk omflyttning,

$$S_n = S_{hn} - S_h$$

Total markytesjunkning

Formler för direkt beräkning av total markytesjunkning

Många av de formler för markytesjunkning som man finner i litteraturen är formaliseringar av empiriska iakttagelser av den totala markytesjunkningen, dvs av summa sjunkning förorsakad av hopsjunkning och sammanpressning samt i viss mån nedbrytning.

En av de i praktiskt bruk mest använda av dessa empiriska formler för total markytesjunkning på myrar är Hallakorpis ytsjunkningsformel. Formeln framlades år 1937 av den finske myrforskaren I.A. Hallakorpi (Hallakorpi, 1938a; jfr 1938b). Den bygger på data publicerade i Gerhardt (1924). Under 1950-talet fick formeln i Tyskland nitiska tillskyndare som H. Segeberg och R. Eggelsmann, vilket i viss mån framgår av de sammanfattande uppsatserna Eggelsmann (1960) och Segeberg (1960). Redan 1952 infördes Hallakorpis ekvation som standardformel för beräkning av markytesjunkning på myrar i Tyska förbundsrepubliken (Illicki & Eggelsmann, 1977; jfr DIN, 1973).

Hallakorpis ekvation har i sin allmänna form följande utseende (se t ex Eggelsmann, 1972 eller DIN, 1973):

$$S_s = a \cdot (0,080 \cdot d_t + 0,066) \quad (11)$$

S_s : Total markytesjunkning (m)

a : Koefficient (-)

d_t : Torvlagrets initiala tjocklek (m)

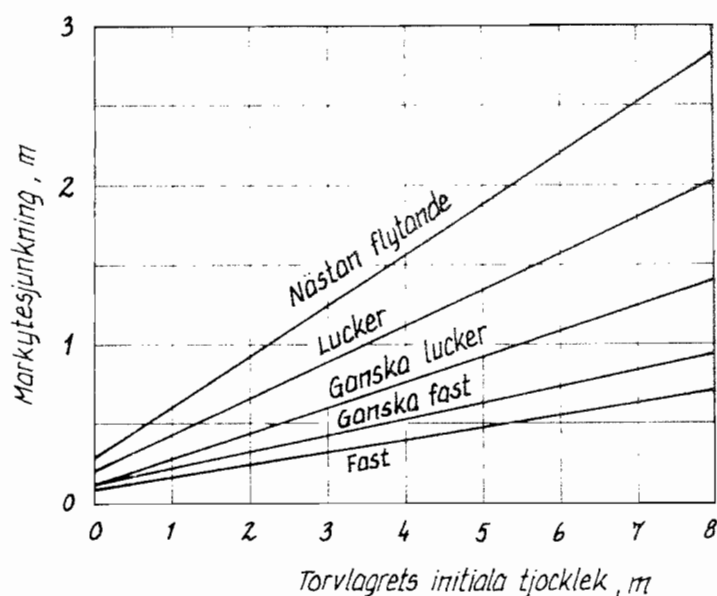
Koefficienten a är en funktion av torvens konsistens och materialitet. Värden på a vid några olika konsistens- eller materialitetsgrupper förtecknas i tabell 8. Där visas även de mot varje a -värde korresponderande markytesjunkningsformlerna.

Tabell 8. Värden på koefficienten a i Hallakorpis formel samt resulterande markytesjunksformler vid olika konsistenser och materialiteter (efter Segeberg, 1960)

Values of coefficient " a " in Hallakorpi's formula and the resulting subsidence formulae at different consistencies and vol-% dry matter (after Segeberg, 1960)

Konsistens	Materialitet, m (vol-%)	Koefficienten a	Ytsjunksformel
Nästan flytande	< 3,0	4,0	$S_s = 0,32 \cdot d_t + 0,26$
Lucker	3,0- 4,9	2,85	$S_s = 0,23 \cdot d_t + 0,19$
Ganska lucker	5,0- 7,4	2,0	$S_s = 0,16 \cdot d_t + 0,13$
Ganska fast	7,5-12,0	1,4	$S_s = 0,11 \cdot d_t + 0,09$
Fast	>12,0	1,0	$S_s = 0,08 \cdot d_t + 0,07$

Markytesjunkningen påverkas alltså av torvens täthet; ju tätare material, desto mindre ytsjunkning (se fig. 4).



Figur 4. Markytesjunkningen som funktion av torvlagrets initiala tjocklek och torvens konsistens (efter Eggelsmann, 1973, 1978).

Subsidence as a function of initial peat depth and peat consistency (after Eggelsmann, 1973, 1978)

Hallakorpis formel är konstruerad för ett dräneringsdjup av 1,1 m efter eventuell markytesjunkning. Vid andra dräneringsdjup kan S_s omräknas med hjälp av följande formel (DIN, 1973):

$$S'_s = S_s \cdot (1 \pm \alpha/1,1) \quad (12)$$

S'_s : Korrigerat värde på total markytesjunkning (m)

α : Avvikelse från dräneringsdjupet 1,1 m (m)

I bilagan visas ett beräkningsexempel med Hallakorpis formel (s. 67).

Ytterligare ett funktionssamband för beräkning av total markytesjunkning för torvjordar är det som på basis av en empirisk rysk formel givits av den polske myrforskaren J. Ostromecki (Ostromecki, 1956). Sambandet har följande utseende:

$$S_s = b \cdot (d_t (z_{df})^2)^{1/3} \quad (13)$$

S_s : Total markytesjunkning (m)
 b : Koefficient (-)
 d_t : Ursprunglig tjocklek på torvlager (m)
 z_{df} : Dräneringsdjup efter markytesjunkning (m)

Koefficienten b är beroende av torvens konsistens och av torr skrymdensitet såsom framgår av tabell 9.

Tabell 9. Samband mellan torvkonsistens, torr skrymdensitet och koefficienten b i Ostromeckis formel (efter Segeberg, 1960)
Relationship between peat consistency, dry bulk density and coefficient "b" in Ostromecki's formula (after Segeberg, 1960)

Konsistens	Torr skrymdensitet, ρ_m (kg/m ³)	Koefficient, b
Flytande	56	0,97
Nästan flytande	67	0,69
Lucker	79	0,49
Ganska lucker	93	0,35
Ganska tät	109	0,25
Tät	128	0,18

Genom att jämföra resultat framräknade med bl a Hallakorpis och Ostromeckis formler har Segeberg (1960) utarbetat följande formel:

$$S_s = k \cdot z_{df} \cdot d_t^{0,707} \quad (14a)$$

S_s : Total markytesjunkning (m)
 k : Koefficient
 z_{df} : Önskat dräneringsdjup efter ytsjunkning (m)
 d_t : Torvlagrets initiala mäktighet (m)

Koefficienten k i Segebergs formel (14a) är enligt de Glopper (1972) beroende av materialiteten, m , enligt formeln

$$k = 0,05 + 1/m \quad (15)$$

Materialiteten kan i sin tur definieras:

$$m = 100 \rho_t / \rho_s \quad (16)$$

m : Materialiteten (vol-% torrsubstans)
 ρ_t : Torr skrymdensitet (kg/m^3)
 ρ_s : Kompaktdensitet (kg/m^3)

de Glopper (1972) anvisar möjligheten att med hjälp av ett nomogram (se figur 12 i Bilagan) skatta materialiteten, m , om viktsprocenten organiskt material, H , och vattenhalten i viktsprocent i mättat tillstånd, $w_{1,m}$, är kända. I brist på markfysikaliska uppgifter kan approximativa värden på m , som är beroende av torvens konsistens, hämtas från tabell 10.

Segebergs formel anges vara giltig för kemiskt sura myrjordar i nordvästra Europa (de Glopper, 1972). För neutrala och basiska myrjordar gäller inte formeln, bl a därför att nedbrytningen i dessa jordar är för stor. Det faktum att Segebergs formel inte är dimensionsriktig hindrar inte att den visat sig ha god praktisk användbarhet.

Tabell 10. Värden på koefficienten k i Segebergs formel vid några olika konsistens- eller materialitetsgrupper (efter de Glopper, 1972)
Values of coefficient "k" in Segeberg's formula for various consistency and vol-% dry matter (after de Glopper, 1972)

Konsistens	Materialitet, m (vol-%)	Koefficient k
Nästan flytande	< 3	0,43
Lucker	3,0- 4,9	0,30
Ganska lucker	5,0- 7,5	0,22
Ganska tät	7,6-12,0	0,15
Tät	>12	0,11

Ett på sina håll då och då brukat beräkningssystem för total markytesjunkning emanerar från ryssen E. G. Svadkovsky (Svadkovsky, 1939; Löddesöl, 1955). Systemet består av ett antal tredjegradslikningar med kurvförlopp som delvis är föga rimliga. På grund av beräkningssystemets brister, antydna av bl a Agerberg (1961), bör det undvikas eller på sin höjd användas med stor försiktighet (t ex för överslagsberäkningar).

Vissa författare delar vid ytsjunkningsberäkningar inte upp markytesjunkningen i hopsjunkning och sammanpressning. Hallakorpis (11), Ostromeckis (13) och Segebergs (14a) formler grundar sig alla på empiriska beräkningar av den totala markytesjunkningen. Andra författare (företrädesvis holländare), såsom framgår av de Glopper (1972), Segeren & Smits (1974) och Schothorst (1976; 1977; 1982), beräknar ytsjunkningen med hjälp av formler som skiljer på de processer som sker över grundvattenytan, hopsjunkning,

och de processer som sker under grundvattenytan, sammanpressning (kompression). Ovanför grundvattenytan påverkas jordlagren främst av tensionsökningen, medan det under grundvattenytan är fråga om en markmekanisk påverkan.

Såsom tidigare nämnts (s. 9 och 11) kan vid ytsjunkningsberäkningar Segebergs formel (14a) tillämpas vid hopsjunkningsberäkningen och Terzaghis formel (7a) vid sammanpressningsberäkningen. Detta gäller i varje fall om de inbegripna jordlagrens sammanlagda tjocklek inte är alltför liten. Är marklagret indelat i skikt med olikheter ifråga om för beräkningen relevanta markfysikaliska egenskaper måste emellertid ekvationerna (14a) och (7a) i viss mån omformuleras. Närmare beskrivning av den metodik som härvidlag kommit till användning i föreliggande arbete återfinnes på s. 28-34.

EXPERIMENTELLA UNDERSÖKNINGAR INOM LILLA BÖLÖ-OMRÅDET. NÅGRA ODLINGSEGENSKAPER HOS OMRÅDETS JORDAR SAMT BERÄKNING AV DEN MARKYTESJUNKNING SOM FÖLJER PÅ EN GRUNDVATTENSTÅNDSSÄNKNING

Allmän presentation av Emåprojektet samt av undersökningsområdet vid Lilla Bölö

Området vid Lilla Bölö ingår i ett större projekt, det s k Emåprojektet. Uppgifterna om Emåprojektet är hämtade ur Departementsskrivelse Jordbruksdepartementet 1977:2, Översvämningsskydd i Emån. Projektet omfattar sex områden längs Emådalen mellan Målilla och Fliseryd. Lilla Bölö ingår i område D (se fig. 9, bilaga), Ryningen, vid Ryningsnäs. Anledning till översvämningarna är att Emåns fåra på den aktuella sträckan är mycket trång. Vid stora översvämningar kan vattenståndet stiga upp till 4 m över medelvattenståndet under vegetationsperioden. Den största översvämningen under senare tid inträffade 1951 då 3430 ha mark, varav 3190 ha åker och bete, översvämmades (se tabell 11). Departementsskrivelsen utgår från att markerna skall skyddas från översvämningar vid flöden av 1951 års storlek.

Området Ryningen berör den tidigare sjön Ryningen, strandmarkerna och sjöbotten, samt Lilla Bölö-området.

Lilla Bölö-området omfattar cirka 75 ha åker och betesmark. Avvattningen sker via ett öppet dike som mynnar i Emån. Vid högvatten i Emån går vatten upp i diket och området översvämmas. Vägbanken på vägen Ryningsnäs-Fliseryd avses därför att användas som vall, och genom pumpning från en pumpanläggning på vägens uppströmssida skulle översvämningarna kunna förhindras.

Tabell 11. Översvämningsskadad areal i Emådalen år 1951 (efter Jordbruksdepartementet, 1977)

Flood-damaged area of Emå valley in 1951 (after Jordbruksdepartementet, 1977)

Område	Åsträcka	Översvämningsskadad areal, ha		
		åker/ bete	övrig mark	summa
A. Fliseryd	Bankeberg-Åsebo	310	-	310
B. Högsby	Åsebo-Högsby	310	20	330
C. Drageryd	Högsby-Blankaström	300	-	300
D. Ryningen	Blankaström-Ryningsnäs	560	120	680
E. Mörlunda	Ryningsnäs-St. Åby	1560	100	1660
F. Hagelsrum	Rosenfors-Hagelsrum	150	-	150
Summa		3190	240	3430

Av de cirka 75 hektaren inom området används en del för vallodling, vissa delar har övergetts p g a försumpning och ett område på ungefär 20-25 ha har aldrig brukats. Det är det sistnämnda området som behandlas i denna undersökning, främst med avseende till en eventuell markytesjunkning efter den permanenta grundvattenståndssänkningen, men även med tanke på att en del andra odlingssegenskaper skulle kunna beröras av grundvattenståndsförändringen.

Material och metoder

Fältarbete

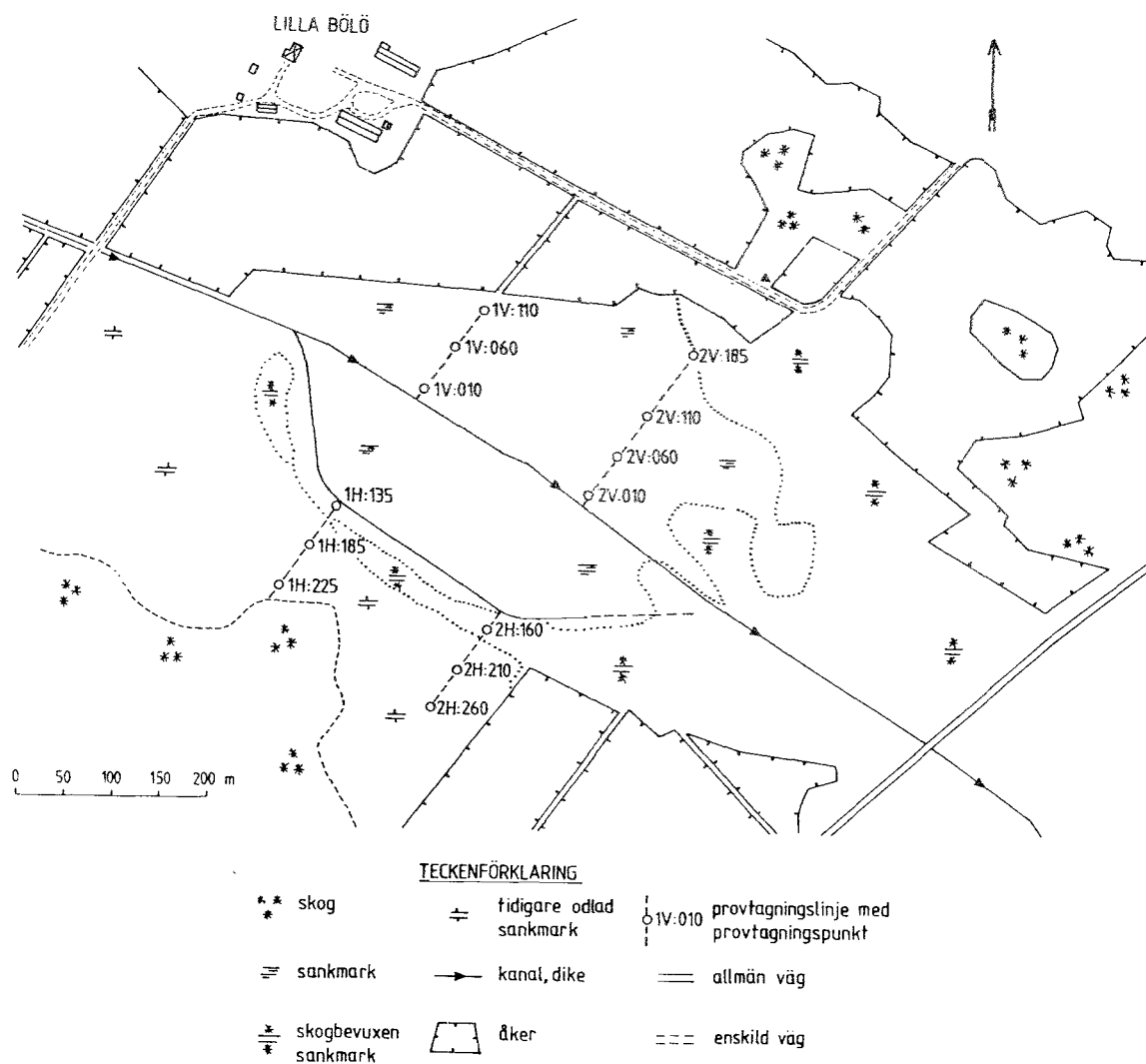
Provtagning och markundersökning skedde utefter två parallella linjer vinkelrätt mot kanalen, tvärs över det försumpade området (se fig. 5). Avsikten var att provpunkterna skulle vara belägna på var femtionde meter efter dessa linjer från kanalen räknat, men p g a svårigheter att ta sig fram i området, bl a därför att en ny kanal grävts, måste ett område i mitten uteslutas.

De fältarbeten som utfördes var sondering till fast botten, uttagning av jordprover, avvägning av provpunkterna samt vid en provpunkt uttagning av volymsäkra jordprov i cylindrar för bestämning av vattenhållande förmåga.

Fältarbetena utfördes den 9-11 november 1983. Området var då, enligt vad brukaren på Lilla Bölö uppgav, ovanligt torrt. Vattenföringsuppgifter från Emån och närliggande åar bekräftar att brukarens utsago säkert hade fog för sig.

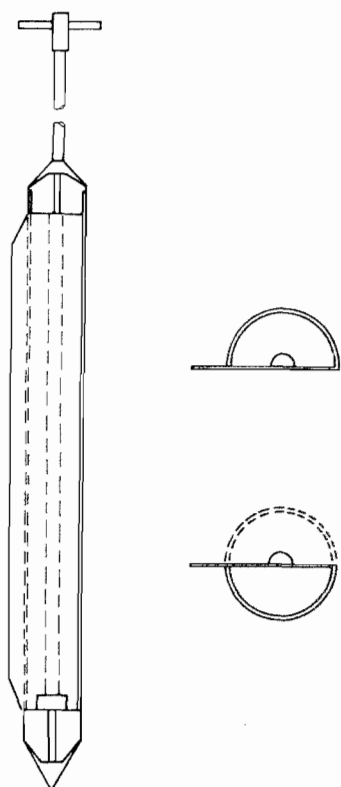
Vid varje provpunkt utfördes sondering till fast botten. Sonderingen gjordes med en sticksond som trycktes ned manuellt.

Jordprover togs ut med s k Ryssborr (se fig. 6). Vid varje undersökningspunkt togs jordprover ned till 3 meters djup i intervall om 0,5 m. På tre punkter fick djupet begränsas p g a att jorden där var för kompakt. Vid skarpt markerade ändringar av lagerföljden inom halvmetersintervallen delades proven. Två paralleller togs vid varje undersökningspunkt.



Figur 5. Karta över undersökningsområdet vid Lilla Bölo med inlagda provtagningslinjer.

Map of the experimental area at Lilla Bölo showing sampling lines.



Figur 6. Skiss över Ryssborren (efter Tammela, 1984)

Outline of the core sampling auger used (after Tammela, 1984)

Undersökningspunkterna samt vattenytan i kanalerna avvägdes i förhållande till en provisorisk fixpunkt på en jordfast sten norr om området (se fig. 5; triangel i förlängningen mot nordost av provtagningslinje 2). Stenen är belägen i ett område med mineraljord.

Volymsäkra jordprov i cylindrar för bestämning av vattenhållande förmåga togs vid punkt 2H:210 (se fig. 5). Ned till djupet 70 cm togs två paralleller ut. Under denna nivå var jordarten varvig lera.

Laboratoriearbete

Proverna vägdes i vått tillstånd, torkades i vakuumtorkskåp och vägdes åter. Eftersom borrhärnans volym gick att räkna fram och proverna bedömdes som tillräckligt volymsäkra kunde skrymdensitetsberäkningar göras. På samtliga prover beräknades torr skrymdensitet. På prover från det lägst liggande partiet i mitten av området, där grundvattnet stod i markytan, antogs proverna vara vattenmättade, och på dessa kunde därför också den våta skrymdensiteten beräknas.

Kompaktdensiteten bestämdes för den översta metern på varje undersökningspunkt, medan glödgningsförlustbestämning gjordes på samtliga jordprov.

Porositeten beräknades för samtliga undersökningspunkter, utom för de två högst belägna punkterna på respektive linje. Beräkningen utfördes med hjälp av sambandet:

$$n = 100 \cdot (1 - \rho_t / \rho_s) \quad (17)$$

n : Porositet (vol.-%)

ρ_t : Torr skrymdensitet (kg/m^3)

ρ_s : Kompaktdensitet (kg/m^3)

Kompaktdensiteten har ej bestämts på samtliga undersökningspunkter. När värde på kompaktdensiteten saknats har närmevärdet 2,2 använts vid gyttjehaltig jord och 2,6 vid mineraljord.

Bestämning av vattenhållande förmåga gjordes på cylindrarna från punkt 2H:210. Proverna vattenmättades och påfördes ökande vattenavförande tryck enligt ett visst schema. Varje vattenavförande tryck motsvaras av en bestämd vattenhalt.

Mätning av pH utfördes dels direkt efter provtagning, dels sedan proverna lufttorkat i sex veckor i aluminiumformar. Organogena jordar innehåller i vissa fall mycket svavel som kan oxideras till svavelsyra, vilket medför en pH-sänkning. Oxidationen kan ske rent kemiskt och/eller med hjälp av mikroorganismer. För att undersöka om en eventuell benägenhet till pH-sänkning på mikrobiell väg förelåg hölls proverna fuktade i formarna i ungefär 3 månader, varefter en ny pH-mätning gjordes. Samtliga pH-värdesbestämningar utfördes i vatten.

Utöver de nämnda analyserna bestämdes halten totalsvavel i markens översta meter.

Metodik för markytesjunkningsberäkningar

Vid ytsjunkningsberäkningarna användes den "holländska metoden" (jfr s. 19) med en uppdelning av ytsjunkningsprocessen i två komponenter, dels hopsjunkningen över grundvattenytan och dels sammanpressningen (kompressionen) under grundvattenytan. Vid hopsjunkningsberäkningen utgicks från Segebergs formel (14a) och vid kompressionsberäkningen från Terzaghis formel (7a). Hallakorpis formel (11) för beräkning av total markytesjunkning kunde inte användas. Formeln är konstruerad för torvjord och jordarten vid Lilla Bölö är i huvudsak gyttjeyord.

Eftersom man i de jordlager som påverkas av hopsjunkningen respektive sammanpressningen kan särskilja ett antal delskikt med olikheter ifråga om för beräkningarna relevanta markfysikaliska karakteristika, så har formelerna (14a) och (7a) modifierats med anledning härav (jfr s. 20). Vi åter kommer strax till detta (s. 28 ff).

Ytsjunkningsberäkningar har endast utförts för en del av området. På den sydvästra sidan av kanalen stiger marknivån ganska brant. Längs linje 2 är höjdskillnaden mellan punkterna 2H:160 och 2H:260 nästan 1,5 m. För de högre liggande punkterna har inga sjunkningsberäkningar gjorts, eftersom marken där redan varit avvattnad och i och med det torde ha varit utsatt för en viss hopsjunkning och kompression. Beräkningarna skulle i dessa fall ha blivit alltför osäkra. Dessa inskränkningar innebar att beräkningar endast kunde göras för den nordöstra sidan av kanalen samt för de två första punkterna på respektive linje på den sydvästra sidan.

Vid beräkningarna har grundvattenytans initiala nivå genomgående approximerats till markytan och antagandet gjorts att grundvattensänkningen blir lika stor vid samtliga beräkningspunkter. Någon hänsyn har således ej tagits till att markytanivån faktiskt i viss utsträckning varierar inom det markområde som beräkningarna gäller (variationsvidden är cirka 20 cm) eller till att vattenytan i kanalen på en del sträckor egentligen stod något under markytan (som mest ungefär 20 cm under).

Beräkningar och resultat

Med ledning av de resultat som framkom genom sondering och avvägning upprättades längsprofiler över de två linjerna med höjdangivelser och djup till fast botten (se fig. 7).

På den nordöstra sidan av kanalen är området mycket flackt, speciellt vid linje 2, medan det på den sydvästra sidan stiger relativt brant mot skogsbrynet. Vid sonderingen visade det sig att djupet till fast botten på den nordöstra sidan vid fyra av de sex provpunkterna översteg 15 m (sonderingsutrustningens längd). Då sondering till detta djup var mycket tids- och arbetskrävande begränsades djupet till 6 m på den sydvästra sidan. Inom det flacka området, där ytsjunkningsberäkningarna gjordes, översteg djupet till fast botten vid samtliga provpunkter 6 m. Detta innebär att ytsjunkningsberäkningarna inte påverkas av otillräcklig sammanlagd tjocklek hos jordlagren (jfr s. 20).

Eftersom det var mycket svårt att genom okulär besiktning avgöra om jordarten var torv- eller gyttjejord användes resultaten från de fysikaliska laboratorieundersökningarna för att bestämma jordarten (se tabell 12, bilaga). Vid bestämningen utgicks från följande riktvärden för respektive jordart:

Jordart	Kompakt- densitet (kg/m ³)	Torr skrym- densitet (kg/m ³)	Vattenmättad skrymdensitet (kg/m ³)
Torvjord	1300 - 1700	50 - 250	1000 - 1100
Gyttjejord	2000 - 2800	250 - 1000	1000 - 1300
Mineraljord	2500 - 2800	1200 - 1500	1400 - 2200

I den översta metern ligger värdena på den torra skrymdensiteten övervägande mellan 200 - 300 kg/m³ och den vattenmättade skrymdensiteten mellan 1000 - 1300 kg/m³. Detta sammanvägt med aktuella värden på kompaktdensitet och glödningsförlust leder till bedömningen att den dominerande jordarten i den översta metern är gyttjejord. Endast upp mot skogsbrynet på den sydvästra sidan är det torvjord i den översta metern. Vid punkterna 2H:210 och 2H:260 underlagras torven direkt av mineraljord (se fig. 7).

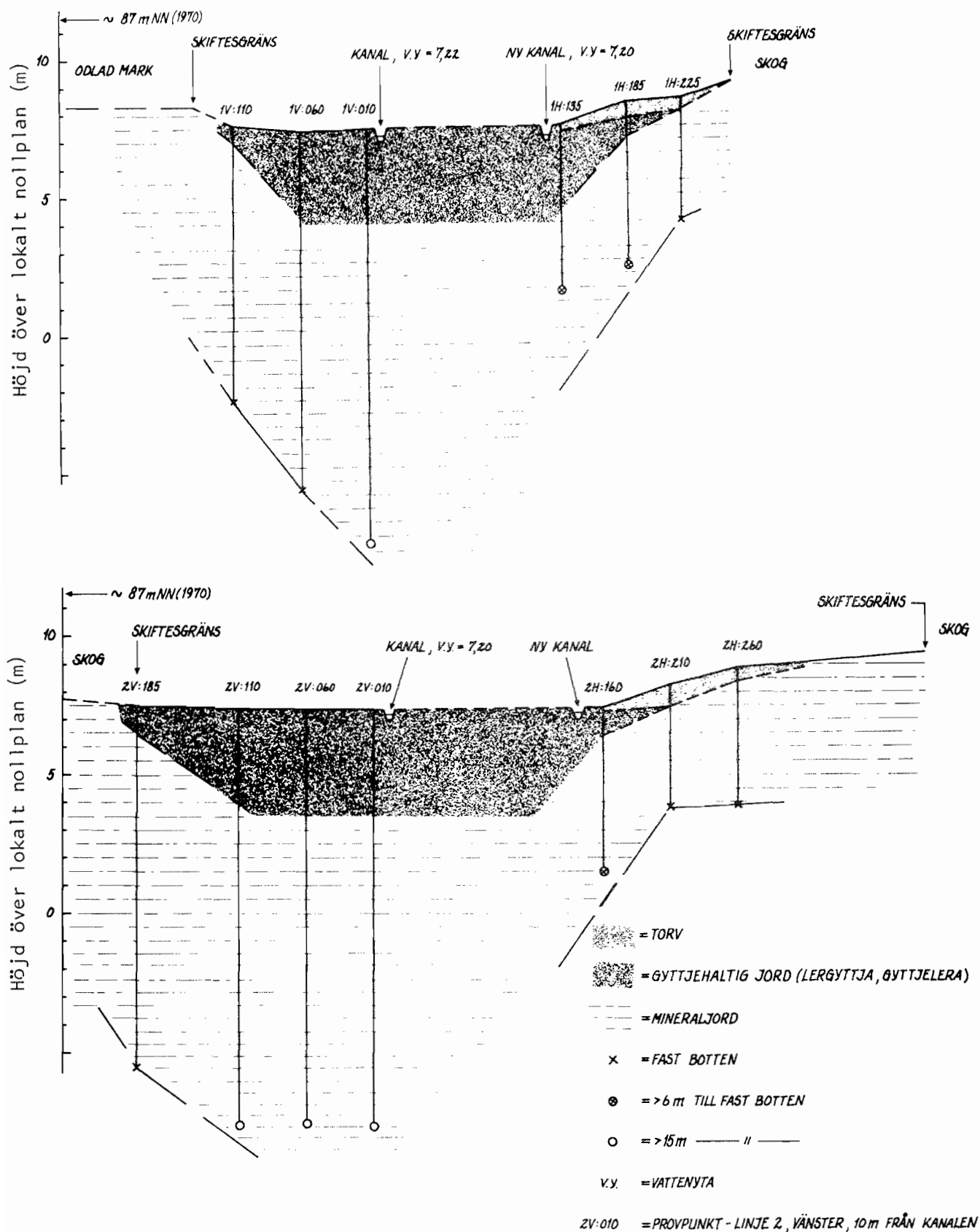
Av volymsdiagrammet (fig. 11, se bilaga) framgår att porositeten är mellan 80 och 82 volymprocent, vilket betyder att jorden har en stor vattenhållande förmåga. Den upptagbara mängden vatten ned till 70 cm är 463 mm. Den fysikaliska vissningsgränsen ligger vid cirka 18 volymprocent i matjorden och sjunker sedan i alven till ungefär 12 volymprocent. Det för växterna tillgängliga vattnet, dvs skillnaden mellan de vattenmängder som finns i jorden vid 1,0 m vattenavförande tryck ($V_{w,t(1,0)}$) och vid den fysikaliskt definierade vissningsgränsen ($V_{w,t(150)}$), är 392 mm ned till 70 cm djup. Det bör påpekas att platsen där provpropparna är tagna ligger inom det område som tidigare varit odlat.

I fig. 13 och 14 (se bilaga) redovisas pH-värdena. Värdena sjunker efter provens lufttorkning, för att sedan åter stiga efter fuktning av proven. I de flesta fall ligger pH mellan 5 och 6 och dessa värden är inte extremt låga för att gälla en organogen jord, eftersom pH-värden under 4 inte är ovanliga på sådana jordar.

Totalsvavelanalysen gav följande resultat:

Provpunkt	Nivå (m)	Totalsvavel (%)
2H:185	0-0,5	0,43
	0,5-1,0	0,17
2V:010	0-0,5	0,21
	0,5-1,0	0,17
2H:210	0-0,5	0,12
	0,5-1,0	0,15

Värdena är högre än för en mineraljord, men inte extremt höga för att gälla en organogen jord.



Figur 7. Tvärsektioner av undersökningsområdet vid Lilla Bölö utefter provtagningslinjerna 1 och 2.

Transverse sections of the experimental area at Lilla Bölö along sampling lines 1 and 2.

Hopsjunkningsberäkningar

Såsom tidigare nämnts (bl a på s. 9) har de Glopper (1972) föreslagit användning av Segebergs formel (14a), egentligen avsedd för beräkning av total markytesjunkning, för skattning av hopsjunkningen ovanför en avsänkt grundvattenyta. Ekvationen (14a) med anslutande hjälpformler (15) och (16) är beskriven på s. 18-19. De ifrågavarande formlerna är:

$$S_s = k \cdot z_{df} \cdot d_t^{0,707} \quad (14a)$$

$$k = 0,05 + 1/m \quad (15)$$

$$m = 100 \cdot \varrho_t / \varrho_s \quad (16)$$

Om ϱ_t och ϱ_s är bekanta kan lämpligen (16) insättas i (15) och därefter (15) i (14a), varigenom ekvation (14a) övergår till:

$$S_s = 0,01 \cdot (5 + \varrho_s / \varrho_t) \cdot z_{df} \cdot d_t^{0,707} \quad (14b)$$

Formel (14b) gäller liksom formel (14a) för beräkning av total markytesjunkning, S_s , och har hela torvlagrets initiala tjocklek, d_t , som en oberoende variabel. Avses skattning av hopsjunkningen bör ekvation (14b) omformas genom att S_s utbytes mot S_h (hopsjunkningens storlek) och d_t mot d_h (hopsjunkningszonens tjocklek). Vi får då:

$$S_h = 0,01 \cdot (5 + \varrho_s / \varrho_t) \cdot z_{df} \cdot d_h^{0,707} \quad (14c)$$

- S_h : Hopsjunkning av hopsjunkningszonen (m)
- ϱ_s : Kompaktdensitet i hopsjunkningszonen (kg/m³)
- ϱ_t : Torr skrymdensitet i hopsjunkningszonen (kg/m³)
- z_{df} : Tilltänkt dräneringsdjup (avsett slutdjup) (m)
- d_h : Tjockleken av hopsjunkningszonen, dvs av den jordzon där hopsjunkningsprocesser äger rum (m)

När, som i här aktuellt fall, hopsjunkningszonen inte är homogen utan man kan särskilja flera dellager med olika värden på ϱ_s och ϱ_t , kan ekvation (14c) lämpligen omformas till:

$$\left. \begin{aligned} S_{h,i} &= 0,01 \cdot \Delta d_i \cdot (5 + \varrho_{s,i} / \varrho_{t,i}) \cdot z_{df} \cdot d_h^{0,707} \\ S_h &= \sum_{i=1}^{N_1} \Delta S_{h,i} \end{aligned} \right\} \quad (14d)$$

- $\Delta S_{h,i}$: Hopsjunkningen i dellagret "i" (m)
- Δd_i : Tjockleken av dellagret "i" (m)
- $\varrho_{s,i}$: Kompaktdensiteten i dellagret "i" (kg/m³)
- $\varrho_{t,i}$: Torr skrymdensitet i dellagret "i" (kg/m³)
- S_h : Summa hopsjunkning i hela hopsjunkningszonen (m)
- N_1 : Ordningsnumret på dellagret omedelbart över den nya grundvattenytan

Storleken av $d_h = \sum \Delta d_i$ definieras av sambandet:

$$d_h = z_{df} + (S_h)_{\max} \quad (18)$$

$(S_h)_{\max}$: Det största med (14d) beräknade hopsjunkningsvärdet, S_h , inom aktuellt område (m)

När det önskade dräneringsdjupet, z_{df} , har bestämts, så kan tjockleken, d_h , av det skikt i vilket hopsjunkningsprocesser äger rum fastställas genom passningsberäkning med ekvation (14d).

För att definitionen av hopsjunkningszonens tjocklek skall gälla förutsättes att denna (d_h) är lika med initialt dräneringsdjup, z_{di} .

I här aktuellt fall har vi valt att sätta $z_{df} = 1,0$ m samt funnit $(S_h)_{\max} = 0,21$ m, varur ett approximativt värde av $1,2$ m fastställts för $d_h (= z_{di})$. Insättes $z_{df} = 1,0$ och $d_h = 1,2$ i ekvation (14d) erhålles

$$\left. \begin{aligned} S_{h,i} &= 0,0114 \cdot \Delta d_i \cdot (5 + \rho_{s,i} / \rho_{t,i}) \\ S_h &= \sum_{i=1}^{N_1} \Delta S_{h,i} \end{aligned} \right\} (14d')$$

Dessa formler har använts vid beräkningen av hopsjunkningen inom Lilla Bölö-området.

Exempel på hur den hopsjunkningsbetingade delen av markytesjunkningen beräknats:

PROVPUNKT 2V:185

Dellagrens		Kompaktdensitet, $\rho_{s,i}$ (kg/m ³)	Torr skrymdensitet, $\rho_{t,i}$ (kg/m ³)	Hopsjunkning, $\Delta S_{h,i}$ (m)
gränser (m)	tjocklek, Δd_i (m)			
0-0,50	0,50	2000	400	0,057
0,50-0,82	0,32	2200	500	0,034
0,82-1,00	0,18	2530	600	0,019
1,00-1,20	0,20	2600	1200	0,016
Summa hopsjunkning ($\sum \Delta S_{h,i}$) vid provpunkt 2V:185				0,126

Resultaten av samtliga hopsjunkningsberäkningar redovisas i tabell 13 (se bilaga) samt i figur 8.

Kompressionsberäkningar

För den del av markytesjunkningen som emanerar från sammanpressningen av jordlagren under den nya grundvattenytan har, i enlighet med de Glopper (1972), Segeren & Smits (1974) och Schothorst (1976; 1977; 1982), använts Terzaghis formel för inneslutna jordlagers komprimering (jfr Terzaghi & Peck, 1948). Utgångsekvation är (7a), dvs

$$S_k = d/c \ln(\bar{\sigma}_2/\bar{\sigma}_1) \quad (\text{jfr s. 11})$$

Formeln (7a) är emellertid alltför allmän för att vara direkt applicerbar för vårt ändamål. Ekvationen måste för det första omformuleras så att det tydligare framgår att den skall tillämpas på jordlager indelade i flera dellager. Vidare bör den för det andra modifieras till att för varje dellager gälla för integralen av alla infinitesimala skikt med tjockleken dz .

För ett skikt med den differentiella tjockleken dz inom ett dellager "i" med gränserna $z_{1,i}$ och $z_{2,i}$ (dellagrets tjocklek: $\Delta d_i = z_{2,i} - z_{1,i}$) gäller:

$$d\Delta S_{k,i} = - \frac{1}{c} \cdot \ln \frac{\bar{\sigma}_{21,i} + \beta_i \cdot z}{\bar{\sigma}_{11,i} + \beta_i \cdot z} dz \quad (7b')$$

$d\Delta S_{k,i}$: Infinitesimal sjunkning p g a kompression av ett differentiellt skikt med tjockleken dz (m)

c : Kompressionskoefficient (-)

$\bar{\sigma}_{21,i}$: Effektivtryck på nivån $z_{1,i}$ (dellagrets överkant) efter grundvattenståndssänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{11,i}$: Effektivtryck på nivån $z_{1,i}$ före grundvattenståndssänkningen (Pa)

β_i : Effektivtrycksgradienten (effektivtrycksökning per m) i dellagret "i" mellan $z_{1,i}$ och $z_{2,i}$ (Pa/m)

z : Djupvariabel (räknas positiv nedåt) (m)

Sjunkningen, $\Delta S_{k,i}$ (i meter), p g a kompression i hela dellagret "i" mellan nivåerna $z_{1,i}$ och $z_{2,i}$ blir:

$$\Delta S_{k,i} = - \frac{1}{c} \int_{z_{1,i}}^{z_{2,i}} \ln \frac{\bar{\sigma}_{21,i} + \beta_i \cdot z}{\bar{\sigma}_{11,i} + \beta_i \cdot z} dz \quad (7b'')$$

Löses (7b') erhålles:

$$\Delta S_{k,i} = \frac{1}{\beta_i \cdot c} (\bar{\sigma}_{11,i} (\ln \bar{\sigma}_{11,i} - 1) - \bar{\sigma}_{12,i} (\ln \bar{\sigma}_{12,i} - 1) - \bar{\sigma}_{21,i} (\ln \bar{\sigma}_{21,i} - 1) + \bar{\sigma}_{22,i} (\ln \bar{\sigma}_{22,i} - 1)) \quad (7b:1)$$

$\bar{\sigma}_{22,i}$: Effektivtrycket på nivån $z_{2,i}$ (dellagrets underkant) efter grundvattenståndssänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{12,i}$: Effektivtrycket på nivån $z_{2,i}$ före grundvattenståndssänkningen (Pa)

En mycket god approximering (maximalfel cirka 0,03 o/oo) av (7b:1) erhålles med hjälp av nedanstående uttryck:

$$\Delta S_{k,i} = \frac{\Delta d_i}{6 \cdot c} \ln \left[\frac{\bar{\sigma}_{21,i} \cdot \bar{\sigma}_{22,i}}{\bar{\sigma}_{11,i} \cdot \bar{\sigma}_{12,i}} \cdot \left(\frac{\bar{\sigma}_{21,i} + \bar{\sigma}_{22,i}}{\bar{\sigma}_{11,i} + \bar{\sigma}_{12,i}} \right)^4 \right] \quad (7b:1*)$$

Δd_i : Dellagret "i:s" tjocklek (m)

För hela den zon som är utsatt för kompression gäller givetvis:

$$S_k = \sum_{N_1+1}^{N_2} \Delta S_{k,i} \quad (7b:2)$$

S_k : Kompressionsbetingad markytesjunkning (vid en viss provpunkt) (m)

N_2 : Ordningsnumret på det djupast liggande av de i sjunkningsberäkningarna medtagna dellagren

Kompressionsberäkningarna gjordes för jordlagren mellan 1,2 m ($= d_h = z_{di}$; jfr s. 29) och 4,0 m. Den kompressibla zonen antogs alltså vara 2,8 m tjock. Någon hänsyn till eventuell kompression på större djup än 4,0 m har icke tagits. Vi ansluter här till vad som brukar vara praxis vid geotekniska undersökningar av liknande typ som den här aktuella. Begränsningen av kompressionsberäkningen till 4,0 m djup kan innebära en viss underskattning av den verkliga, kompressionsbetingade markytesjunkningens storlek.

De markfysikaliska undersökningarna av Lilla Bölö-området har endast berört de tre översta metrarna i profilerna, varför den vattenmättade skrymdensiteten, ρ_m , i dellagret mellan 3,0 och 4,0 m har måst skattas.

Effektivtrycken (de kumulerade effektivtrycken) vid underkanten av varje dellager definieras av följande uttryck:

$$\bar{\sigma}_{12,p} = g \cdot \sum_1^p (\Delta d_i \cdot (\rho_{m,i} - 1000)) \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{22,p} &= g \cdot \sum_1^p (\Delta d_i \cdot \rho_{m,i}) \\ p &\leq N_1 \end{aligned} \right\} \quad (20a)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{22,p} &= g \cdot \left(\sum_1^{N_1} (\Delta d_i \cdot \rho_{m,i}) + \sum_{N_1+1}^p (\Delta d_i \cdot (\rho_{m,i} - 1000)) \right) \\ p &> N_1 \end{aligned} \right\} \quad (20b)$$

Vidare gäller att effektivtrycken vid överkanten av varje dellager kan definieras sålunda:

$$\bar{\sigma}_{11,p} = \bar{\sigma}_{12,p-1} \quad (21)$$

$$\bar{\sigma}_{21,p} = \bar{\sigma}_{22,p-1} \quad (22)$$

Teckenförklaringar till formlerna (19)-(22):

$\bar{\sigma}_{12,p}$: Effektivtrycket vid underkanten av dellagret
"p" före grundvattenståndssänkningen (Pa)

g: Accelerationen vid fritt fall (m/s²)

Δd_i : Tjockleken av det arbiträra dellagret "i" (med
"i" gående från 1 till p) (m)

$\rho_{m,i}$: Vattenmättad skrymdensitet i dellagret "i"
(med "i" gående från 1 till p) (kg/m³)

$\bar{\sigma}_{22,p}$: Effektivtrycket vid underkanten av dellagret
"p" efter grundvattenståndssänkningen (Pa)

N_1 : Numret på dellagret omedelbart över nya
grundvattenytan

$\bar{\sigma}_{11,p}$: Effektivtrycket vid överkanten av dellagret
"p" före grundvattenståndssänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{21,p}$: Effektivtrycket vid överkanten av dellagret
"p" efter grundvattenståndssänkningen (Pa)

I tabellerna 6a, 6b och 7 (se litteraturgenomgången) redovisas uppskattningar av kompressionskoefficienten för olika jordarter. Gyttja finns inte med i dessa tabeller men kan, enligt H. Gottfrietz, K-Konsult (muntl. medd. 1987), i fråga om kompressionsegenskaper jämföras med ganska fast torv. Normalt skulle enligt tabellerna koefficienten sättas till 6 för den gyttjehaltiga jorden och till 9 för mineraljorden (lera). Dessa värden gäller emellertid för jordar som aldrig tidigare varit avvattnade. En jämförelse mellan å ena sidan den porositet och den torra skrymdensitet som anges i tabell 4 och å andra sidan den faktiska porositet och torra volymvikt som jorden vid Lilla Bölö uppvisar, (se bilaga, tabell 12), indikerar tydligt att en viss hopsjunkning och kompression redan har skett inom området. Kompressionskoefficienten har därför satts till 11 för gyttjehaltig jord och 15 för mineraljord. Som jämförelse har även beräkningar gjorts med koefficientvärdena 6 resp. 9, beräkningar vars resultat kan sägas representera en övre gräns för kompressionens storlek.

Exempel på hur den kompressionsbetingade delen av markytesjunkningen beräknats

PROVPUNKT 2V:185

A: Bestämning av de successivt kumulerade effektivtrycken, före och efter grundvattenståndssänkningen (jfr tabellerna 14a och 14b i bilagan)

Dellagrens		Vattenm. skrymden- sitets, ρ_m (kg/m ³)	Eff.tryck (Pa) ut- övat av dellagret på dess underlag		Kumulerat effektiv- tryck (Pa) vid del- lagrets underkant	
gränser (m)	tjocklek Δd_i (m)		före s.	efter s.	före s.	efter s.
0-0,50	0,50	1300	150·g	650·g	150·g	650·g
0,50-0,82	0,32	1600	192·g	512·g	342·g	1162·g
0,82-1,00	0,18	1500	90·g	270·g	432·g	1432·g
1,00-1,20	0,20	1800	160·g	360·g	592·g	1792·g
1,20-1,50	0,30	1800	240·g	240·g	832·g	2032·g
1,50-2,00	0,50	2300	650·g	650·g	1483·g	2682·g
2,00-2,50	0,50	2000	500·g	500·g	1982·g	3182·g
2,50-3,00	0,50	2000	500·g	500·g	2482·g	3682·g
3,00-4,00	1,00	2000	1000·g	1000·g	3482·g	4682·g

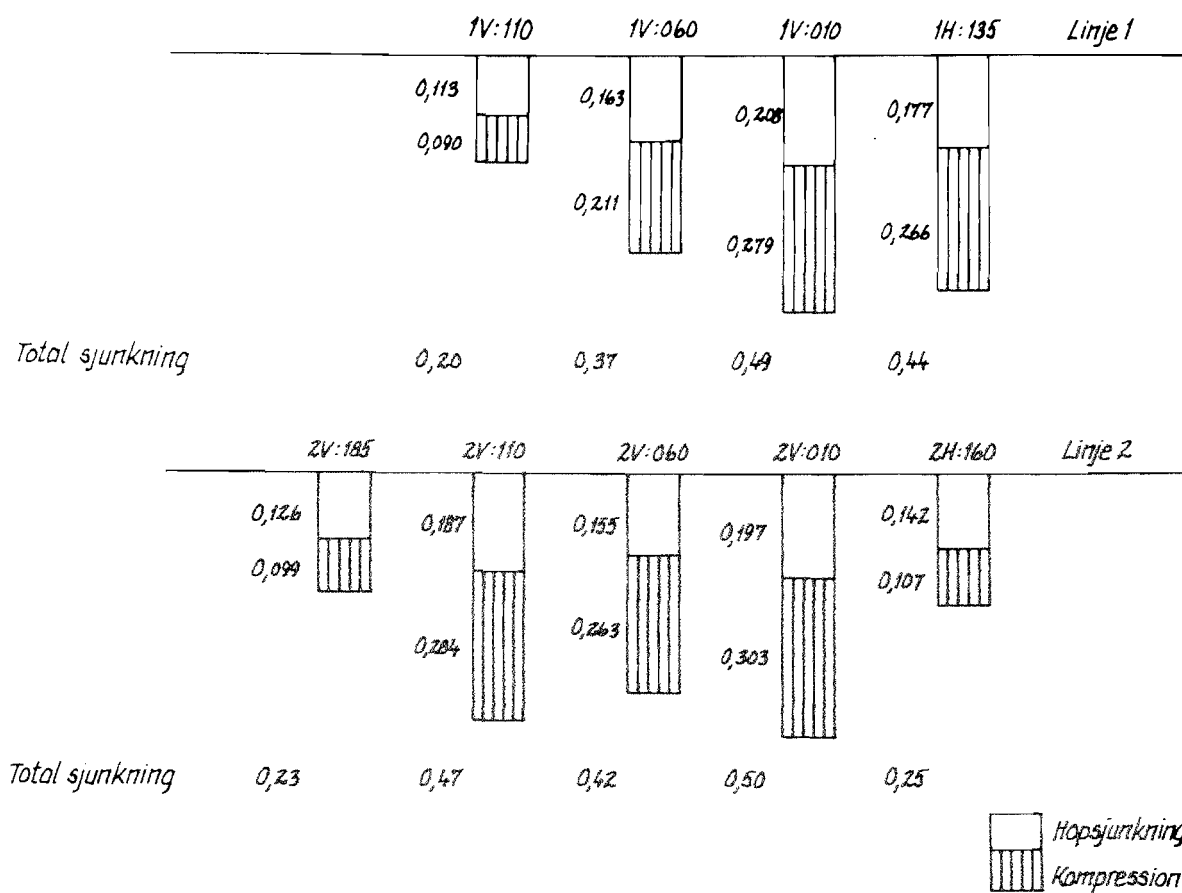
B: Beräkning av dellagrens kompression ($\Delta S_{k,i}$) samt av summa kompression ($\sum \Delta S_{k,i}$) i hela lagret 1,2-4,0. Kompressionskoefficienten = 15.

Dellagrens		Eff.trycks- gradient, β_i (Pa/m)	Eff.trycket (Pa) före sänkningen		Eff.trycket (Pa) efter sänkningen		Kompression $\Delta S_{k,i}$ (m)
gränser (m)	tjocklek Δd_i (m)		överk. ($\bar{\sigma}_{11,i}$)	underk. ($\bar{\sigma}_{12,i}$)	överk. ($\bar{\sigma}_{21,i}$)	underk. ($\bar{\sigma}_{22,i}$)	
1,2-1,5	0,3		800 g	592 g	832 g	1792 g	
1,5-2,0	0,5	1300 g	832 g	1482 g	2032 g	2682 g	0,024
2,0-2,5	0,5	1000 g	1482 g	1982 g	2682 g	3182 g	0,018
2,5-3,0	0,5	1000 g	1982 g	2482 g	3182 g	3682 g	0,014
3,0-4,0	1,0	1000 g	2482 g	3482 g	3682 g	4682 g	0,023
Summa kompression ($\sum \Delta S_{k,i}$) vid provpunkt 2V:185							0,099

Övriga resultat av kompressionsberäkningarna redovisas i tabell 15 (se bilaga) samt i figur 8.

Total markytesjunkning

Den totala markytesjunkningen, hopsjunkning plus kompression, framgår av tabell 16 (se bilaga) samt av fig. 8. Den största totala markytesjunkningen redovisas från provpunkterna i kanalens närhet. Provpunkter i utkanterna av området uppvisar i tre av fyra fall sjunkningar som är avgjort mindre än övriga.



Figur 8. Hopsjunknings- och kompressionssjunkning samt total markytesjunkning (kompressionskoefficienten har satts till 11 för gyttjehaltig jord och till 15 för mineraljord) vid provplatserna inom Lilla Bölö-området (m). *Subsidence due to shrinkage and consolidation and total subsidence (m) at sampling sites in the Lilla Bölö area (Coefficient of compression set at 11 for gyttja soil and 15 for mineral soil).*

DISKUSSION

Huvudsyftet med detta arbete har varit att ta fram underlag för en prognos av storleken av den markytesjunkning som följer på en grundvattenståndssänkning, inom i första hand undersökningsområdet i Emådalen. Det är inte möjligt att beräkna ytsjunkningen tillnärmelsevis exakt, varför de värden som framtagits endast får ses som riktvärden, vilka ger en uppfattning om sjunkningens storleksordning. Skulle de här framtagna resultaten utnyttjas eller åberopas i andra sammanhang än för vilka de framtagits, bör man vara medveten om osäkerheten i de gjorda beräkningarna.

Faktorerna som bidrar till osäkerheten är många. Utgångsformeln (14a) för den ekvation (14d) som använts för beräkning av den markytesjunkning som betingas av hopsjunkning är ursprungligen konstruerad för torvjord, och

det var enbart vid en av provpunkterna som jordarten bedömdes som torv och då endast inom de översta 50 centimetrarna. Jordarten ställer också till problem vid val av kompressionskoefficient för kompressionsberäkningarna med formlerna (7b:1) och (7b:2) på s. 31. I tabellerna 6a, 6b och 7 (i litteraturgenomgången) redovisas överslagsvärden på kompressionskoefficienten. Några värden för gyttjejordar finns över huvud taget inte. Det kan också vara diskutabelt att skatta kompressionskoefficienten endast med hjälp av torvens konsistens, utan att ta hänsyn till torvslag och humifieringsgrad. De organogena jordarnas ursprung gör att de får mycket varierande egenskaper. För att öka säkerheten i beräkningarna bör därför koefficientvärdena helst tas fram genom kompressionsmätningar på laboratorium. Eftersom de jordprover som används är små i förhållande till hela jordlagret är det önskvärt att kompressionsmätningar utförs på minst två paralleller.

Ett annat problem vid valet av kompressionskoefficient är svårigheten att bedöma om aktuellt markområde i väsentlig grad har varit utsatt för hopsjunkning och sammanpressning tidigare. Ett sätt att bemästra detta problem är att jämföra porositet och skrymdensitet hos den aktuella jorden med värden på dessa parametrar hos motsvarande jordart i konsoliderat eller okonsoliderat tillstånd (se tab. 7, litteraturgenomgången). Med hänsyn till bl a detta har i kompressionsberäkningarna koefficienten satts till 11 för den gyttjehaltiga jorden och 15 för mineraljorden. Enligt de tillgängliga riktvärdena på kompressionskoefficienten skall den för ett helt okonsoliderat tillstånd vara 6 för gyttjehaltig jord och 9 för mineraljord. Beräkningarna som gjorts med dessa lägre koefficienter kan anses ge maximumvärden för sammanpressningen (och för totala markytesjunkningen).

Beräkningarna av den kumulerade totala markytesjunkningen (med hänsyn till hopsjunkning och kompression) gav värden från 0,20 till 0,50 m (vid kompressionskoefficienterna 11 resp. 15), med i princip de högsta värdena i närheten av kanalen och de lägre utåt kanterna av området (tabell 16, bilagan). Detta resultat innebär att grundvattenytan totalt sett skulle behöva sänkas omkring 1,5 m för att en dränering på 1,0 m varaktigt skall kunna upprätthållas inom hela området. Vid en jämförelse med andra myr-
torrlägningsföretag (se litteraturgenomgången) verkar de framräknade resultaten vara av rimlig storleksordning. Det måste dock i sammanhanget poängteras att det är svårt att jämföra resultat från olika områden med varandra med tanke på de organogena jordarnas mycket skiftande egenskaper.

En förutsättning för sjunkningsberäkningarnas giltighet är givetvis att detaljdikningen göres så djup i förhållande till initialt markplan att den efter markens hopsjunkning kommer att ligga på avsett slutdjup (z_{df}). Det erforderliga djupet ($z_{di} = d_h$) är i här aktuellt fall 1,2 m. Ett annat villkor som måste uppfyllas är att grundvattennivån skall sänkas lika mycket som summan av avsett slutdjup och den största beräknade totala markytesjunkningen (jfr formel (18) på s. 29), i vårt fall 1,5 m.

Med kompressionskoefficienterna 6 resp. 9 blir den kumulativt beräknade totala markytesjunkningen från 0,26 till 0,75 m (tabell 16, bilagan).

Den största delen av markytesjunkningen (till följd av hopsjunkning och sammanpressning) på organogena jordar sker inom 5 år. Däremot fortgår nedbrytningen av det organiska materialet, det s k torvsvinnet så länge det finns organiskt material kvar. Torvsvinnet ("bortodlingen") blir dessutom större vid en intensiv dränering. I Sverige brukar man räkna med en "bortodling" av ungefär 0,5 cm/år vid bete, cirka 1 cm/år vid vallodling och 1,5-2,0 cm/år vid öppen odling. Vid odling av grödor som kräver intensiv jordbearbetning, såsom potatis eller morötter, kan torvsvinnet bli ännu större. Dessa värden gäller för torvjord. På gyttjejordar räknar man inte med någon markytesjunkning som följd av nedbrytning av organiskt material, vilket är värt att notera med tanke på att jordarna på undersökningsområdet vid Lilla Bölö i dominerande utsträckning är gyttjehaltiga jordar.

Resultatet av pH-undersökningen är något svårförklarligt. En genomgående tendens är att pH sjönk efter lufttorkningen, vilket var väntat. Det som är svårare att förklara är höjningen av pH då proverna hölls fuktade. Även om totalsvavelhalten var relativt låg för att vara en gyttjehaltig jord, vilket indikerar att någon större risk för ytterligare pH-sänkning genom mikrobiell nedbrytning inte torde föreligga, så är det ändå förvånande att pH-värdena steg. I vissa fall steg pH-värdena över ursprungsnivån.

Av volymsdiagrammet (figur 11, se bilaga) framgår att vattnet i matjorden är relativt löst bundet. Ett vattenavförande tryck på 1,0 m vattenpelare ger en luftfylld porvolym på hela 28 volymprocent. Det kan alltså uppstå problem med för mycket luft i matjorden, vilket inte är ovanligt på organogena jordar.

Det för växterna tillgängliga vattnet, dvs mängden vatten i jorden vid 1,0 m vattenavförande tryck, $V_{w,t(1,0)}$, minus den del av vattnet som är så hårt bundet att växterna inte kan ta upp den, $V_{w,t(150)}$, beräknades till 392 mm ned till 70 cm djup. I alven är vattnet relativt hårt bundet och den luftfyllda porvolymen vid 1,0 m vattenavförande tryck understiger 10 volymprocent, vilket anses vara ett minimum för god rottillväxt. Rotdjupet kan därför på grund av bristande lufttillgång komma att begränsas till 30-40 cm djup. Vid ett rottdjup av 40 cm blir mängden växttillgängligt vatten 193 mm, vilket får betecknas som ett stort vattenförråd. Vissningsgränsen bör dock på organogena jordar bestämmas genom odling, eftersom lågt pH-värde kan begränsa växternas möjligheter att ta upp vatten. Tyvärr kunde inte detta göras vid undersökningen på grund av att större cylindrar än vanligt användes. Enligt pH-bestämningen föreligger dock inte någon pH-spärr som kan begränsa rottdjupet.

Platsen där provpropparna är uttagna uppvisar en markprofil som inte är representativ för det område för vilket ytsjunkningsberäkningarna utförts. Jordarten vid provpunkten är torvjord till 70 cm djup och därunder varviga till skillnad från det stora ytsjunkningsberäknade området i mitten vilket består av gyttjehaltig jord. Däremot är det område som provet representerar det som bör komma först i fråga vid eventuell odling. Detta område har varit odlat tidigare och skulle med en mindre grundvattensänkning vara möjligt att åter odla. De lägre liggande områdena kräver däremot en betydande grundvattensänkning, enligt beräkningarna minst 1,5 m.

SAMMANFATTNING

Denna studie av markytesjunkningen omfattar dels en litteraturstudie, dels en praktisk tillämpning. Litteraturgenomgången visar bl a att ytsjunkning efter markavvattning förorsakas av främst två processer, nämligen hopsjunkning och sammanpressning (kompression). På torvjordar tillkommer dessutom nedbrytning av det organiska materialet, ledande till s k torvsvinn ("bortodling").

Storleken av den totala markytesjunkningen är, förutom av grundvattenståndssänkningens storlek, beroende bl a av de inbegripna jordlagrens porvolymen samt av de initiala torv- och dräneringsdjupen.

Hopsjunkningen äger rum över grundvattenytan och är i första hand en fysikalisk process, förorsakad av den tensionsökning som inträder efter en permanent grundvattenståndssänkning. Eftersom organogena jordar har ett svagare markskelett än mineraljordar, resulterar tensionsökningen i en större hopsjunkning på de förstnämnda än på de sistnämnda.

Kompressionen, som sker under den nya grundvattenytan, är en mekanisk process orsakad av en ökning av trycket på djupare liggande jordlager. Totaltrycket på ett jordlager är sammansatt av effektivtryck och porvattentryck. Effektivtrycket har en avgörande betydelse för hållfastheten hos jordmaterialet. Detta tryck ökar efter en grundvattenståndssänkning.

Nedbrytningen är en kemisk och biokemisk process. Storleken av nedbrytningen är bl a beroende av klimat och av bruksintensitet.

Hopsjunkning och kompression sker de första åren efter en torrläggning, medan nedbrytning (resulterande i torvsvinn, "bortodling") fortgår så länge de biokemiska förutsättningarna för denna process är tillfinnandes.

Åtskilliga formler för separat beräkning av hopsjunkning och sammanpressning är publicerade. Dessutom finns formler för den summerade effekten av hopsjunkning och kompression, dvs för det som kan kallas den totala eller sammanlagda markytesjunkningen.

Ett försök att under svenska förhållanden tillämpa några av dessa formler gjordes i den här redovisade undersökningen av ett område vid Lilla Bölö, Ryningsnäs, i Småland. Området ingår i det s k Emåprojektet. En invallning av området planeras som skydd mot översvämningar. Jordprover togs ut hösten 1983 längs två linjer vinkelrätt mot den kanal som avvattnar det undersökta området.

För ytsjunktionsberäkningarna har ett förfaringsätt använts som i princip bygger på en metod föreslagen av de Gloppe (1972), enligt vilken olika formler tillämpas för hopsjunktions- resp. kompressionsberäkningarna.

Vid beräkningen av den hopsjunkningsbetingade markytesjunkningen har utgångsekvationen varit Segebergs formel:

$$S_s = k \cdot z_{df} \cdot d_t^{0,707} \quad (14a)$$

- S_s : Total markytesjunkning (m)
 k : Koefficient, beroende av jordens (torvens) materialitet, m
 z_{df} : Önskat dräneringsdjup efter ytsjunkning (m)
 d_t : Torvlagrets initiala mäktighet (m)

Formeln (14a) har sedan modifierats att gälla en flerskiktad hopsjunkningszon med kända värden på kompaktdensitet och torr skrymdensitet i de olika skikten. Den nya formeln har följande utseende:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{h,i} &= 0,01 \cdot \Delta d_i \cdot (5 + \rho_{s,i} / \rho_{t,i}) \cdot z_{df} \cdot d_h^{0,707} \\ S_h &= \sum_{i=1}^{N_1} \Delta S_{h,i} \end{aligned} \right\} \quad (14d)$$

- S_h : Hopsjunkning i hela hopsjunkningszonen (m)
 $\Delta S_{h,i}$: Hopsjunkning i dellager "i" (m)
 Δd_i : Tjocklek av dellager "i" (m)
 $\rho_{s,i}$: Kompaktdensitet i dellager "i" (kg/m³)
 $\rho_{t,i}$: Torr skrymdensitet i dellager "i" (kg/m³)
 d_h : Hopsjunkningszonens tjocklek (m)
 N_1 : Ordningsnumret på dellagret omedelbart över den nya grundvattenytan

För hopsjunkningszonens tjocklek, d_h , gäller att den är lika med initialt dräneringsdjup, z_{di} , och att den kan sättas approximativt lika med summan av tilltänkt dräneringsdjup, z_{df} , och maximal hopsjunkning, $(S_h)_{\max}$, inom aktuellt markområde, eller

$$d_h = z_{df} + (S_h)_{\max} \quad (18)$$

- $(S_h)_{\max}$: Det största med (14d) beräknade hopsjunkningsvärdet, S_h , inom aktuellt område (m)

Utgångsekvationen för beräkning av den kompressionsbetingade markytesjunkningen har varit Terzaghis formel för inneslutna jordlagars komprimering,

$$S_k = \frac{d}{c} \ln(\bar{\sigma}_2 / \bar{\sigma}_1) \quad (7a)$$

S_k : Markytesjunkning p g a kompression av jordlagren under den nya grundvattenytan (m)

d : Tjocklek av kompressibelt jordlager (m)

c : Kompressionskoefficient (-)

$\bar{\sigma}_2$: Effektivtryck efter grundvattensänkning (Pa)

$\bar{\sigma}_1$: Effektivtryck före grundvattensänkning (Pa)

Formel (7a) har omvandlats till att gälla flerskiktade kompressionszoner och infinitesimala effektivtrycksförändringar. Den modifierade formeln har följande utseende:

$$\Delta S_{k,i} = \frac{1}{\beta_i \cdot c} (\bar{\sigma}_{11,i} \cdot (\ln \bar{\sigma}_{11,i} - 1) - \bar{\sigma}_{12,i} \cdot (\ln \bar{\sigma}_{12,i} - 1) - \bar{\sigma}_{21,i} \cdot (\ln \bar{\sigma}_{21,i} - 1) + \bar{\sigma}_{22,i} \cdot (\ln \bar{\sigma}_{22,i} - 1)) \quad (7b:1)$$

$$S_k = \sum_{N_1+1}^{N_2} \Delta S_{k,i} \quad (7b:2)$$

$\Delta S_{k,i}$: Markytesjunkning p g a kompression i dellagret "i" (m)

β_i : Effektivtrycksgradient (effektivtrycksökning per m) i dellagret "i" (Pa/m)

$\bar{\sigma}_{11,i}$: Effektivtryck vid överkanten av dellager "i" före grundvattensänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{12,i}$: Effektivtryck vid underkanten av dellager "i" före grundvattensänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{21,i}$: Effektivtryck vid överkanten av dellager "i" efter grundvattensänkningen (Pa)

$\bar{\sigma}_{22,i}$: Effektivtryck vid underkanten av dellager "i" efter grundvattensänkningen (Pa)

N_1 : Ordningsnumret på dellagret omedelbart över den nya grundvattenytan

N_1+1 : Ordningsnumret på dellagret omedelbart under den nya grundvattenytan

N_2 : Ordningsnumret på det djupast liggande av de i sjunkningsberäkningarna medtagna dellagren

De fyra olika effektivtrycken $\bar{\sigma}_{11}$, $\bar{\sigma}_{12}$, $\bar{\sigma}_{21}$ och $\bar{\sigma}_{22}$ definieras av ekvationerna (19)-(22) på s. 32 såsom funktioner av accelerationen vid fritt fall, g (m/s^2), dellagertjocklek, $4d_i$ (m), och vattenmättad skrymdensitet, $\rho_{m,i}$ (kg/m^3), i resp. dellager.

Två olika sjunkningsberäkningar har utförts. Enda skillnaden mellan dem gäller valet av värden på koefficienten c i ekvation (14d). Rimliga värden på c bedömdes vara 11 för den gyttjehaltiga jorden och 15 för mineraljorden. Med användning av dessa c -värden beräknades den totala markytesjunkningen vid de olika provpunkterna bli från 0,20 m till 0,50 m. Dessa sjunkningar innebär att om ett dräneringsdjup av 1,0 m skall kunna upprätthållas över hela området, så måste vattenståndet i kanalen sänkas med cirka 1,5 m i förhållande till nuläget.

Beräkningarna visade att den totala markytesjunkningen i princip kan förväntas bli störst invid kanalen och avtaga med avståndet från denna.

Förutom de undersökningar som var direkt påkallade som underlag för beräkning av markytesjunkningen, utfördes dels en bestämning av jordens vattenhållande förmåga dels vissa studier (pH-mätningar och svavelanalys) i avsikt att belysa risken för kemisk försurning till följd av en eventuell torrläggning av undersökningsområdet.

Jordens vattenhållande förmåga undersöktes på prov från delområdet med torvjord. Vid ett rot djup av 40 cm var mängden växttillgängligt vatten 193 mm, vilket får betecknas som ett stort vattenförråd. Under 40 cm var andelen luft i profilen mindre än 10 %. Detta anses vara ett minimum för en god rotutveckling, varför rot djupet kan komma att begränsas till huvudsakligen markens översta 30 å 40 cm.

Efter det att jordproverna dels lufttorkats och dels hållits fuktade uppmättes pH till mellan 5 och 6. Totalsvavelhalten var inte speciellt hög för att gälla en organogen jord och någon risk för en kraftig pH-sänkning efter torrläggning verkar inte föreligga.

Den dominerande jordarten inom undersökningsområdet är gyttjehaltig jord. I de något högre liggande partierna mot kanterna av området består marken av torvjord, underlagrad av varvig lera.

SUMMARY

This study of subsidence consists in part of literature review and in part of a practical investigation. The literature review shows that subsidence after drainage is mainly the result of two processes, shrinkage and consolidation. Peat soils are subject to a third process, that of breakdown of organic matter.

The total amount of subsidence depends on factors such as porosity of the drained soil layers and the original peat depth and groundwater level.

Shrinkage occurs above the groundwater table and is primarily a physical process. It is caused by an increase in tension arising after permanent lowering of the watertable. Since peat soils have a weaker soil skeleton than mineral soils, this increase in tension results in a greater shrinkage of the former.

Compression, which occurs under the new groundwater level, is a mechanical process brought about by increased load on lower soil layers. The total stress exerted on a soil layer consist of two forces, effective stress and pore pressure. Effective stress, which is a decisive component of soil strength, increases when the groundwater table is lowered.

Breakdown of organic matter is a chemical and biochemical process. The amount of subsidence due to breakdown is dependent on factors such as climate and intensity of cultivation.

Shrinkage and compression occur within the first years after drainage while breakdown continues as long as biochemical activity is possible.

Numerous formulae for separate prediction of shrinkage and compression have been published. Furthermore, formulae have been derived which give a value for combined shrinkage and compression (commonly referred to as total or cumulative subsidence).

An experiment applying these formulae under Swedish conditions, which was carried out at Lilla Böllö, Ryningsnäs in the Swedish province Småland, is described in this report. The area forms a part of the so called Emåproject. A system of embankments is planned to protect the area from flooding. Soil sampling was carried out in the autumn of 1983 along two lines sited at right angles to the main drainage canal.

Calculation of subsidence was in principle based on a method proposed by de Glopper (1972), by which separate formulae are used to determine shrinkage and compression.

Calculations of surface subsidence due to shrinkage applied Segeberg's formula in a preliminary step:

$$S_s = k \cdot z_{df} \cdot d_t^{0,707} \quad (14a)$$

S_s : Total surface subsidence (m)

k : Coefficient based on vol-% dry matter, m, of the peat

z_{df} : Desired drain depth after subsidence (m)

d_t : Original thickness of the peat layer (m)

Formula (14a) was then modified for apply for a zone of shrinkage of several layers of which dry bulk density values and density of solids values are known. This new equation has the form:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{h,i} &= 0,01 \cdot \Delta d_i \cdot (5 + \rho_{s,i}/\rho_{t,i}) \cdot z_{df} \cdot d_h^{0,707} \\ S_h &= \sum_1^{N_1} \Delta S_{h,i} \end{aligned} \right\} (14d)$$

S_h : Shrinkage in the whole zone of shrinkage (m)

$\Delta S_{h,i}$: Shrinkage in layer "i": (m)

Δd_i : Thickness of layer "i" (m)

$\rho_{s,i}$: Density of solids in layer "i" (kg/m³)

$\rho_{t,i}$: Dry bulk density in layer "i" (kg/m³)

d_h : Thickness of zone of shrinkage (m)

N_1 : Number referring to the layer directly above the new groundwater level

The thickness of the zone of shrinkage, d_h , is equal to the initial depth of drainage, z_{di} , and approximately equal to the sum of the desired drainage depth, z_{df} , and the maximum shrinkage, $(S_h)_{\max}$, within the actual soil area, thus

$$d_h = z_{df} + (S_h)_{\max} \quad (18)$$

where $(S_h)_{\max}$ is the greatest theoretical amount of shrinkage (m) which can occur in the soil calculated from equation (14d).

Calculations of surface subsidence due to compression were based on Terzaghi's formula for compression of confined soil layers

$$S_k = \frac{d}{c} \ln(\bar{\sigma}_2/\bar{\sigma}_1) \quad (7a)$$

- S_k : Surface subsidence due to compression of soil layers under the new groundwater level (m)
 d : Thickness of the compressible soil profile (m)
 c : Compression coefficient (-)
 $\bar{\sigma}_2$: Effective stress after watertable lowering (Pa)
 $\bar{\sigma}_1$: Effective stress before watertable lowering (Pa)

Equation (7a) has been modified to apply for a zone of compression of several layers and for infinitesimal changes in effective stress, thus:

$$\Delta S_{k,i} = \frac{1}{\beta_i \cdot c} (\bar{\sigma}_{11,i} (\ln \bar{\sigma}_{11,i} - 1) - \bar{\sigma}_{12,i} (\ln \bar{\sigma}_{12,i} - 1) - \bar{\sigma}_{21,i} (\ln \bar{\sigma}_{21,i} - 1) + \bar{\sigma}_{22,i} (\ln \bar{\sigma}_{22,i} - 1)) \quad (7b:1)$$

$$S_k = \sum_{N_1+1}^{N_2} \Delta S_{k,i} \quad (7b:2)$$

- $\Delta S_{k,i}$: Surface subsidence due to compression in layer "i" (m)
 β_i : Effective stress gradient (increase in effective stress per m) in layer "i" (Pa/m)
 $\bar{\sigma}_{11,i}$: Effective stress at the upper boundary of layer "i" before lowering of the watertable (Pa)
 $\bar{\sigma}_{12,i}$: Effective stress at the lower boundary of layer "i" before lowering of the watertable (Pa)
 $\bar{\sigma}_{21,i}$: Effective stress at the upper boundary of layer "i" after lowering of the watertable (Pa)
 $\bar{\sigma}_{22,i}$: Effective stress at the lower boundary of layer "i" after lowering of the watertable (Pa)
 N_1 : Number referring to the layer directly above the new groundwater level
 N_1+1 : Number referring to the layer directly below the new groundwater level
 N_2 : Number referring to the deepest layer included in calculation of compression

The four effective stresses $\bar{\sigma}_{11}$, $\bar{\sigma}_{12}$, $\bar{\sigma}_{21}$ and $\bar{\sigma}_{22}$ are defined by equations 19-22, pp 32, as functions of acceleration of free fall (due to gravity), g , thickness of the layer, Δd_i , and saturated bulk density, $\rho_{m,i}$ in respective layers.

Two different calculations of subsidence were carried out. They differ only in value of coefficient "c" in equation (14d). Suitable values of "c" were considered to be: 11 for gyttja-containing soil and 15 for mineral soil. Using these values of "c", calculated total subsidence was between 0.20 and 0.50 m. Such subsidence means that to achieve an eventual drainage depth of 1.0 m throughout the entire area, water level in canals must initially be lowered by 1.5 m below its present level.

Calculations showed that total subsidence was greatest near the canal and decreased with distance from the canal.

Apart from investigations necessary for subsidence calculations, moisture-holding capacity of the soil was determined and some studies (pH-measurements and sulphur analysis) were carried out in order to assess the possible risk of chemical acidification as a result of drainage.

Moisture-holding capacity was measured in a sample from the peat area. Plant available water within a rootzone of 40 cm depth was found to be 193 mm, which represents a considerable store of water. Below 40 cm, the air content of the profile was less than the 10 % which is considered a minimum value allowing root development. Root depth may thus be limited to 30-40 cm.

The pH of soil samples, some of which were air-dried and some kept moist, was found to lie within the range 5 to 6. Total sulphur content was within the normal limits for an organic soil and risk of a drastic pH decrease brought about by drainage would not appear to be great.

The predominant soil type in the area contains significant amounts of gyttja. The somewhat higher ground at the perimeter of the area consists of peat overlying varved clay.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Agerberg, L. S. 1956. Brännbergsmýrens sättning. - Statens Jordbruksförsök, Uppsala. Meddelande 77.
- Agerberg, L. S. 1961. Några studier av nivåförändringar på myrjord. - Grundförbättring 14:3, s. 141-176.
- Berglund, G., Håkansson, A. & Eriksson, J. 1980. Om dikningsintensiteten vid dränering av åkerjord. Resultat av fältförsök med olika dikesavstånd. III: Jönköpings, Kronobergs, Kalmar och Gotlands län. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 122 (s. 8-13).
- Berglund, K. 1982. Beskrivning av fem myrjordsprofiler från Gotland. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 125.
- Broms, B. 1981. Grundkurs i jord- och bergmekanik. Stockholm: Kungl. Tekniska Högskolan. Inst. för jord- och bergmekanik.
- DIN. 1973. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Physikalische Laboruntersuchungen; Bestimmung der Moorsackung nach Entwässerung. - Deutsche Institut für Normung (DIN). DIN 19683, Blatt 19.
- Eggelsmann, R. 1960. Untersuchungen über Dränsackungen im Moor. - Zeitschrift für Kulturtechnik 1:2, s. 91-114.
- Eggelsmann, R. 1972. Dränbemessung im Moor nach Tiefe, Abstand und Art. - Telma 2, s. 91-108.
- Eggelsmann, R. 1973. Dränanleitung für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau, 1:a uppl., s. 184-191. Hamburg: Verlag Wasser und Boden.
- Eggelsmann, R. 1978. Subsurface drainage instructions. - National Committee of the Federal Republic of Germany. International Commissions on Irrigation and Drainage (ICID). Bulletin 6, s. 166-172.
- Gerhardt, P. 1924. Landwirtschaftlicher Wasserbau, 5:e uppl. Leipzig.
- de Glopper, R. J. 1972. Subsidence. I "Fieldbook for land and water management experts. Provisional edition", s. 503-523. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Haefeli, R. & Schaad, W. 1944. Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers. - Schweizerische Bauzeitung 123:23, s. 267-271; 123:24, s. 286-289; 123:25, s. 295-299.
- Hallakorpi, I. A. 1938a. Beiträge zur Frage der Moorsackung. - Internationale bodenkundliche Gesellschaft. 3. Tagung, Zürich 1937. Verhandlungen der 6. Kommission. Teil B, s. 332-339. Tryckt 1938.

- Hallakorpi, I. A. 1938b. Några iakttagelser rörande myrars och myrdräners sättning i Finland. - Lantbruksveckan, Stockholm. Handlingar 27, s. 46-59.
- Hovde, O. 1979. Myrsynking. Undersökelse på Ny Jords försöksgrd Holstad, Smöla. - Jord og Myr 3:1, s. 72-81.
- Illicki, P. 1977. Sackung in wiederholt entwässerten Hochmooren des nordwestdeutschen Flachlandes. 3. Bericht: Vorausberechnung der Moorsackung. - Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 18:3, s. 153-165.
- Illicki, P. & Eggelsmann, R. 1977. Sackung in wiederholt entwässerten Hochmooren des nordwestdeutschen Flachlandes. 1. Bericht: Höhenverluste im wiederholt entwässerten Kehdinger Hochmoor. - Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 18:1, s. 23-34.
- Illicki, P. & Kuntze, H. 1977. Sackung in wiederholt entwässerten Hochmooren des nordwestdeutschen Flachlandes. 2. Bericht: Zusammen-drückbarkeit der Torfe und Moorsackung. - Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 18:2, s. 74-82.
- Jordbruksdepartementet. 1977. Översvämningsskydd i Emån. Departementsskri-velse Jordbruksdepartementet 1977:2, s. 92-111.
- KTH exempelsamling. U. å. Räkneövningar i geoteknik. - Stockholm: Kungl. Tekniska Högskolan.
- Kuntze, H. 1976. Soil conservation on cultivated peatlands. - 5th International Peat Congress, Poznan 1976. Proceedings 1, s. 257-269.
- Löddesöl, Aa. 1955. Orientering om synkingsproblemet på myr. - Det norske myrselskap. Meddelelser 53:1, s. 7-36.
- McAfee, M. 1985a. The rise and fall of Bälinge mossar. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 147.
- McAfee, M. 1985b. Ytsänkning på torvjord. Bälinge mossar 1904-1984. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Avdelningsmeddelande 85:3.
- van der Molen, W. H. 1975. Subsidence of peat soils after drainage. - International Association of Hydrological Science (IAHS). AISH/IAHS Publication 105, s. 183-186.
- Ostromecki, J. 1956. Projektowanie profilu podłużnego rowów i drenów w torfowiskach z uwzględnieniem osiadania (Designing the longitudinal profile of ditches and drainage for peat lands, with consideration given to subsidence). - Roczniki nauk rolniczych, seria F, 71F:3, s. 739-778.

- Osvald, H. 1937. Myrar och myrodling. Stockholm: Kooperativa förbundets Förlag.
- Schothorst, C. J. 1976. Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. - 5th International Peat Congress, Poznan 1976. Proceedings 1, s. 206-217.
- Schothorst, C. J. 1977. Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. - Geoderma 17:4, s. 265-291.
- Schothorst, C. J. 1982. Drainage and behavior of peat soils. - International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen. Publication 30, s. 153-163.
- Segeberg, H. 1960. Moorsackungen durch Grundwasserabsenkung und deren Vor-ausberechnung mit Hilfe empirischer Formeln. - Zeitschrift für Kulturtechnik 1:3, s. 144-161.
- Segeren, W. A. & Smits, H. 1974. Drainage of newly reclaimed marine clayey sediments, peat soils, and acid-sulphate soils. - International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen. Publication 16:IV, 1:a uppl., s. 261-295.
- Smedema, L. K. & Rycroft, D. W. 1983. Land drainage: Planning and design of agricultural drainage systems, s. 320-325. London: Batsford Academic and Education Ltd.
- Stenberg, M. 1936. Gisselåsmýrens sättning under tioårsperioden 1922-1932. - Lantbruksveckan, Stockholm. Handlingar 24 (1935 års Handlingar, tryckta 1936), s. 172-191.
- Stephens, J. C. & Stewart, E. H. 1977. Effect of climate on organic soil subsidence. - International Association of Hydrological Science (IAHS). AISH/IAHS Publication 121, s. 647-655.
- Svadkovsky, E. G. 1939. Deposition of peat and diminution of the depth of draining canals in marshlands. - Vsesoujuznaja ordena Lenina akademija sel'skochoz'ajstvennykh nauk imeni V. I. Lenina. Doklady 1939:23/24, s. 56-59.
- Tammela, P.-T. 1984. Kompendium i torvekonomi. - Uppsala: Sveriges Geologiska AB.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. 1948. Soil mechanics in engineering practice, s. 56-73. New York: John Wiley & Sons.

Muntliga meddelanden:

- Berglund, K. 1987. Sveriges Lantbruksuniversitet, Avd. för lantbrukets hydroteknik, 750 07 Uppsala.
- Gottfrietz, H. 1987. K-konsult, Liljeholmstorget 7, 117 80 Stockholm.

BILAGA

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	Sid.
Beteckningar - <i>List of symbols</i>	50
Figur 9. Karta över översvämningsskadad mark kring Emån vid toppflöden av 1951 års storlek.	55
Figur 10. Karta över åsträcken Blankaström-Ryningsnäs (med Lilla Bölö-området)	56
Figur 11. Diagram över några markfysikaliska karakteristika från provpunkt 2H:210 inom Lilla Bölö-området	56
Figur 12. Nomogram för bestämning av materialiteten, m , (efter de Glopper, 1972)	57
Figur 13. pH-värden längs undersökningslinje 1 vid Lilla Bölö	58
Figur 14. pH-värden längs undersökningslinje 2 vid Lilla Bölö	59
Tabell 12. Några markfysikaliska data från de olika provplatserna vid Lilla Bölö	60
Tabell 13. Sammanfattning av hopsjunkningsberäkningarnas resultat	62
Tabell 14a. Successivt kumulerade effektivtryck i profilerna vid provpunkterna längs linje 1 vid Lilla Bölö	63
Tabell 14b. Successivt kumulerade effektivtryck i profilerna vid provpunkterna längs linje 2 vid Lilla Bölö	64
Tabell 15. Sammanfattning av kompressionsberäkningarna med koefficienten c lika med 11 för gyttjehaltig jord och 15 för mineraljord	65
Tabell 16. Total markytesjunkning vid Lilla Bölö, dvs summan av hopsjunkning och kompression	66
Beräkningsexempel med Hallakorpis formel: Total markytesjunkning enligt formel (11) (Utan samband med undersökningsområdet vid Lilla Bölö)	67

BETECKNINGAR - LIST OF SYMBOLS

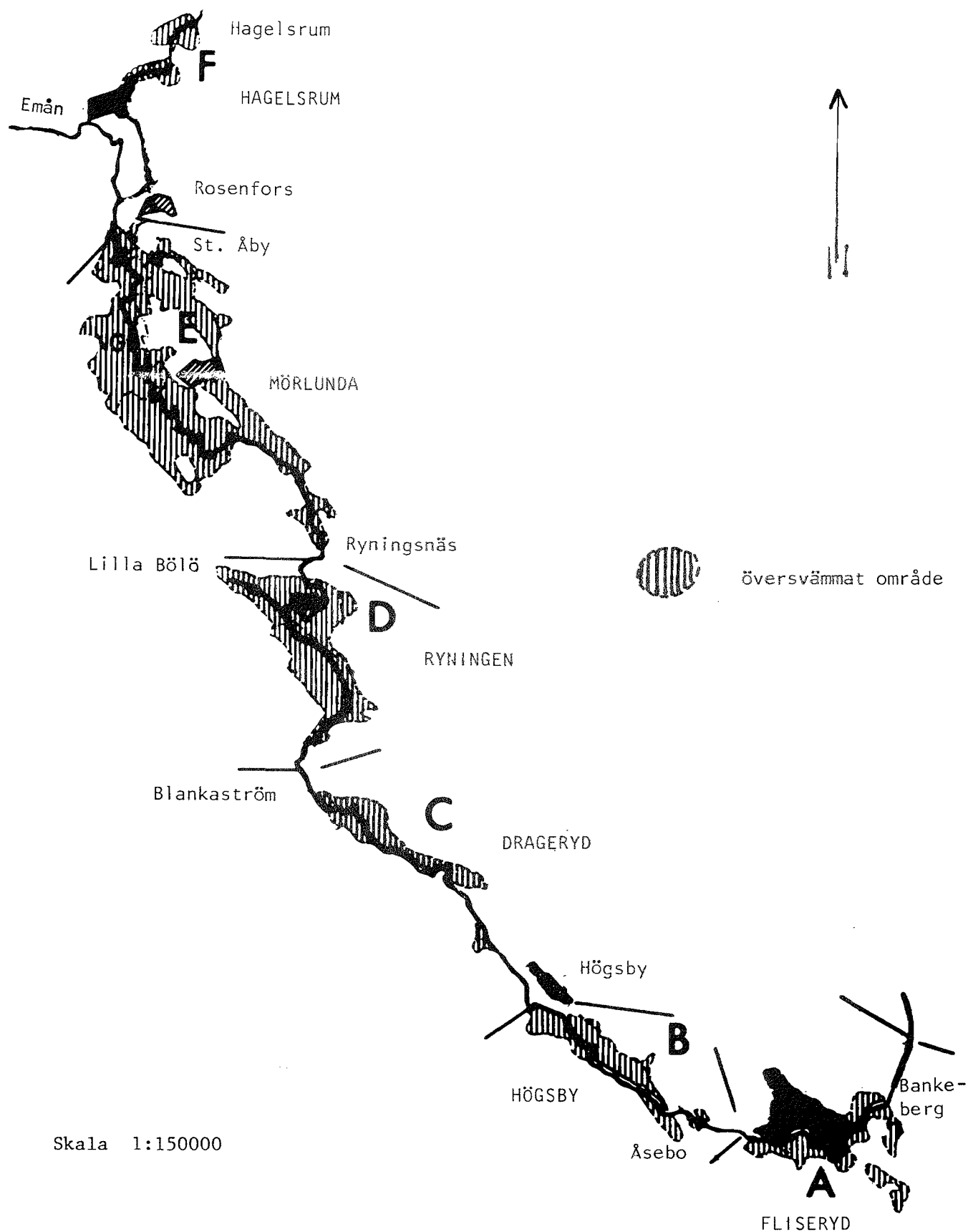
a:	Koefficient i Hallakorpi's yt-sjunkningsformel (-)	<i>Coefficient in Hallakorpi's formula for total subsidence of peat (-)</i>
b:	Koefficient i Ostromeckis yt-sjunkningsformel (-)	<i>Coefficient in Ostromecki's formula for total subsidence of peat (-)</i>
c:	Koefficient i Terzaghis formel för inneslutna jordlagers komprimering (-)	<i>Coefficient in Terzaghi's formula for compression of confined layers of soil (-)</i>
d:	Lagertjocklek, allmänt (m)	<i>Thickness of layers, general (m)</i>
d_1 :	Tjocklek av jordlager <u>före</u> en grundvattensänkning (m)	<i>Thickness of the soil layer <u>before</u> lowering of the groundwater level (m)</i>
d_2 :	Tjocklek av jordlager sedan jämvikt inträtt <u>efter</u> en grundvattensänkning (m)	<i>Thickness of the soil layer when equilibrium has been reached <u>after</u> lowering of the groundwater level (m)</i>
d_h :	Initial tjocklek av hopsjunkningszonen (m)	<i>Original thickness of shrinkage zone (m)</i>
Δd_i :	Tjocklek av dellagret "i" /före grundvattensänkningen/ (m)	<i>Thickness of layer "i" /before lowering of the groundwater level/ (m)</i>
d_t :	Torvlagrets initiala mäktighet (m)	<i>Original thickness of peat layer (m)</i>
d_w :	Tjocklek av vattenlager (m)	<i>Thickness of water layer (m)</i>
g:	Accelerationen vid fritt fall (m/s^2)	<i>Acceleration of free fall (m/s^2)</i>
H:	Halt organiskt material (vikts-%)	<i>Organic matter content</i>
k:	Koefficient i Segebergs yt-sjunkningsformel	<i>Coefficient in Segeberg's formula for (total) subsidence</i>
m:	Materialitet (vol-% torrsubstans)	<i>Vol-% dry matter (%)</i>
N_1 :	Ordningsnummer på understa dellagret i hopsjunkningszonen	<i>Number referring to the lowest layer in the zone of shrinkage</i>
N_2 :	Ordningsnummer på understa dellagret i kompressionszonen	<i>Number referring to the lowest layer in the zone of compression</i>

Q_{10} :	Bas för exponentialfunktion	<i>Base of exponential function</i>
S_h :	Markytesjunkning p g a hopsjunkning (m)	<i>Surface subsidence due to shrinkage (m)</i>
$(S_h)_{\max}$:	Största markytesjunkning p g a hopsjunkning inom ett visst område (m)	<i>Greatest subsidence due to shrinkage within a certain area (m)</i>
$S_{h,i}$:	Markytesjunkning p g a hopsjunkning i dellager "i" ("i" antar heltalsvärden från 1 till N_1) (m)	<i>Surface subsidence due to shrinkage in layer "i" ("i" is an integer between 1 and N_1) (m)</i>
S_{hn} :	Markytesjunkning p g a hopsjunkning <u>och</u> nedbrytning (m)	<i>Surface subsidence due to shrinkage <u>and</u> breakdown of organic matter (m)</i>
S_k :	Markytesjunkning p g a kompression (m)	<i>Surface subsidence due to compression (m)</i>
$\Delta S_{k,i}$:	Markytesjunkning p g a kompression av dellager "i" ("i" antar heltalsvärden från N_1+1 till N_2) (m)	<i>Surface subsidence due to the compression of layer "i" ("i" is an integer between N_1+1 and N_2) (m)</i>
S_n :	Markytesjunkning p g a nedbrytning (m)	<i>Surface subsidence due to breakdown of organic matter (m)</i>
S_s :	Total markytesjunkning (m)	<i>Total subsidence (m)</i>
S_s' :	Korrigerat värde på den totala markytesjunkningen, beräknad med Hallakorpi's formel (m)	<i>Corrected value for total subsidence calculated by Hallakorpi's formula (m)</i>
\bar{T} :	Årsmedeltemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$)</i>
T_n :	Den lägsta temperatur vid vilken oxidation äger rum ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Lowest temperature at which oxidation occurs ($^{\circ}\text{C}$)</i>
v :	Torr skrymvolymitet hos jorden, allmänt (m^3/kg)	<i>Dry bulk specific volume of soil, general (m^3/kg)</i>
v_1 :	Torr skrymvolymitet hos jorden <u>före</u> grundvattensänkning (m^3/kg)	<i>Dry bulk specific volume of soil <u>before</u> lowering of the groundwater level (m^3/kg)</i>

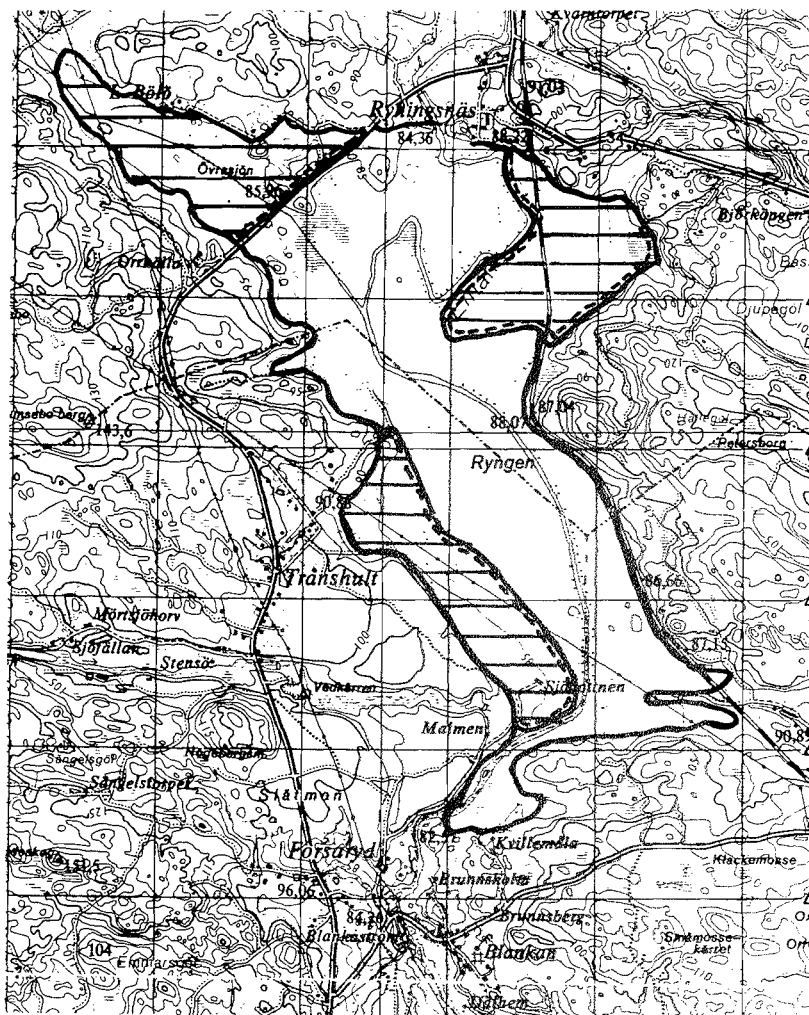
v_2 :	Torr skrymvolymitet hos jorden sedan jämvikt inträtt <u>efter</u> grundvattensänkning (m^3/kg)	<i>Dry bulk specific volume of soil when equilibrium has been reached <u>after</u> lowering of the groundwater level (m^3/kg)</i>
v_M :	Torr skrymvolymitet hos jordens mineraldel, allmänt (m^3/kg)	<i>Dry bulk specific volume of the mineral fraction of the soil, general (m^3/kg)</i>
V_m :	Materialvolym (mm)	<i>Volume of solids (mm)</i>
V_n :	Porvolym (mm)	<i>Volume of pores (mm)</i>
$V_{w,t(1,0)}$:	Vattenmängd vid ett vattenavförande tryck av 1,0 m vp, dvs vid 1,0 m dränering (mm)	<i>Amount of water at a suction of 1.0 m wc, i.e. at 1.0 m drainage depth (mm)</i>
$V_{w,t(150)}$:	Vattenmängd vid ett vattenavförande tryck av 150 m vp, dvs vid den fysikaliskt definierade vissningsgränsen (mm)	<i>Amount of water at a suction of 150 m wc, i.e. at the physically defined wilting point (mm)</i>
$w_{l,m}$:	Jordens vattenhalt vid vattenmättnad (vikts-%)	<i>Water content of soil at saturation</i>
$w_{t(1,0)}$:	Vattenhalt vid ett vattenavförande tryck av 1,0 m vp, dvs vid 1,0 m dränering (vol-%)	<i>Water content at a suction of 1.0 m wc, i.e. at 1.0 m drainage depth (vol-%)</i>
$w_{t(150)}$:	Vattenhalt vid ett vattenavförande tryck av 150 m vp, dvs vid den fysikaliskt definierade vissningsgränsen (vol-%)	<i>Water content at a suction of 150 m wc, i.e. at the physically defined wilting point (vol-%)</i>
z :	Djupvariabel, allmänt (m)	<i>Depth variable, general (m)</i>
z_{df} :	Tilltänkt dräneringsdjup (m)	<i>Desired depth of drainage (m)</i>
z_{di} :	Initialt dräneringsdjup (m)	<i>Initial depth of drainage (m)</i>
α :	Korrektionskoefficient för Hallakorpis ytsjunkningsformel	<i>Correction coefficient for Hallakorpi's subsidence formula</i>
β_i :	Effektivtrycksgradient i dellager "i" (Pa/m)	<i>Effective stress gradient in layer "i" (Pa/m)</i>
μ :	Porvattentryck (Pa)	<i>Pore pressure (Pa)</i>

$\rho_{H,1}$:	Torr skrymdensitet hos det organiska materialet mellan gamla och nya grundvattenytan (kg/m^3)	Dry bulk density of organic matter between the old and the new groundwater levels (kg/m^3)
$\rho_{H,2}$:	Torr skrymdensitet hos det organiska materialet strax under nya grundvattenytan (kg/m^3)	Dry bulk density of organic matter just below the new groundwater level (kg/m^3)
ρ_m :	Jordens vattenmättade skrymdensitet, allmänt (kg/m^3)	Saturated bulk density of the soil, general (kg/m^3)
$\rho_{m,i}$:	Vattenmättad skrymdensitet i dellager "i" (kg/m^3)	Saturated bulk density in layer "i" (kg/m^3)
$\rho_{M,1}$:	Torr skrymdensitet hos jordens mineraldel mellan gamla och nya grundvattenytan (kg/m^3)	Dry bulk density of the soil's mineral fraction between the old and the new groundwater level (kg/m^3)
$\rho_{M,2}$:	Torr skrymdensitet hos jordens mineraldel strax under nya grundvattenytan (kg/m^3)	Dry bulk density of the soil's mineral fraction just below the new groundwater level (kg/m^3)
ρ_s :	Jordens kompaktdensitet, allmänt (kg/m^3)	Density of solids of the soil, general (kg/m^3)
$\rho_{s,i}$:	Kompaktdensitet i dellager "i" (kg/m^3)	Density of solids in layer "i" (kg/m^3)
ρ_t :	Torr skrymdensitet, allmänt (kg/m^3)	Dry bulk density, general (kg/m^3)
$\rho_{t,i}$:	Torr skrymdensitet i dellager "i" (kg/m^3)	Dry bulk density in layer "i" (kg/m^3)
ρ_w :	Vattnets densitet (kg/m^3)	Density of water (kg/m^3)
σ :	Totaltryck (Pa)	Total stress (Pa)
$\bar{\sigma}$:	Effektivtryck, allmänt (Pa)	Effective stress, general (Pa)
$\bar{\sigma}_1$:	Effektivtryck <u>före</u> grundvattensänkning, allmänt (Pa)	Effective stress <u>before</u> lowering of the groundwater level, general (Pa)
$\bar{\sigma}_{11,i}$:	Effektivtryck vid <u>överkanten</u> av dellager "i" <u>före</u> grundvattensänkning (Pa)	Effective stress at the <u>upper</u> boundary of layer "i" <u>before</u> lowering of the groundwater level (Pa)

$\bar{\sigma}_{12,i}$:	Effektivtryck vid <u>underkanten</u> av dellager "i" <u>före</u> grundvattensänkning (Pa)	<i>Effective stress at the <u>lower</u> boundary of layer "i" <u>before</u> lowering of the groundwater level (Pa)</i>
$\bar{\sigma}_2$:	Effektivtryck <u>efter</u> grundvattensänkning, allmänt (Pa)	<i>Effective stress <u>after</u> lowering of the groundwater level, general (Pa)</i>
$\bar{\sigma}_{21,i}$:	Effektivtryck vid <u>överkanten</u> av dellager "i" <u>efter</u> grundvattensänkning (Pa)	<i>Effective stress at the <u>upper</u> boundary of layer "i" <u>after</u> lowering of the groundwater level (Pa)</i>
$\bar{\sigma}_{22,i}$:	Effektivtryck vid <u>underkanten</u> av dellager "i" <u>efter</u> grundvattensänkning (Pa)	<i>Effective stress at the <u>lower</u> boundary of layer "i" <u>after</u> lowering of the groundwater level (Pa)</i>



Figur 9. Karta över översvämningsskadade markområden kring Emån vid toppflöden av 1951 års storlek (efter Jordbruksdepartementet, 1977).
 Map showing soil areas damaged by floodwaters at peak floods such as that of 1951 (after Jordbruksdepartementet, 1977).



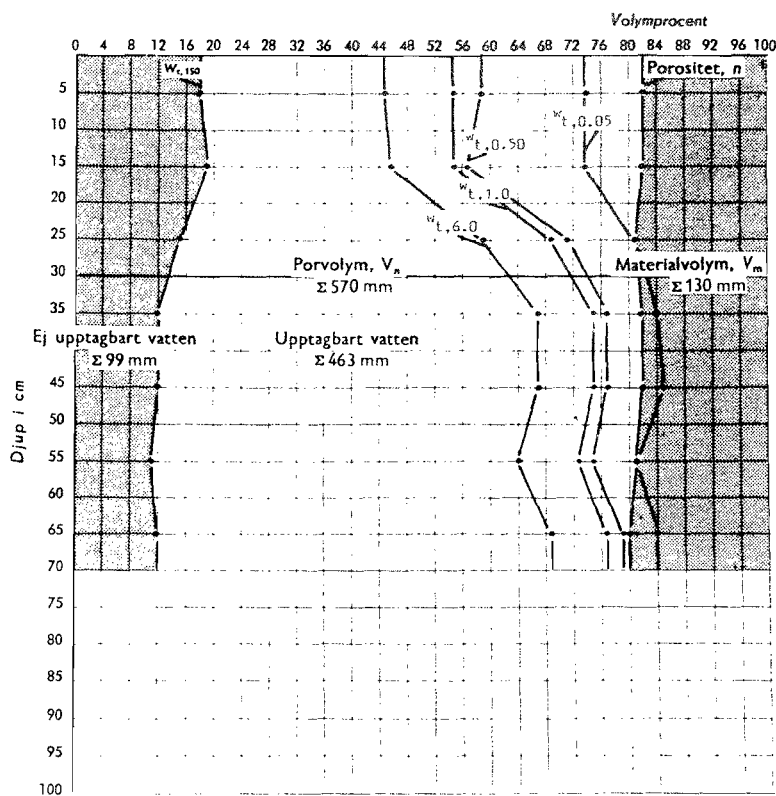
— Gräns för över-
svämningsskador
Boundary of flood
damage

— Invallningsvall
Embankment system

Skala 1:50000

Figur 10.

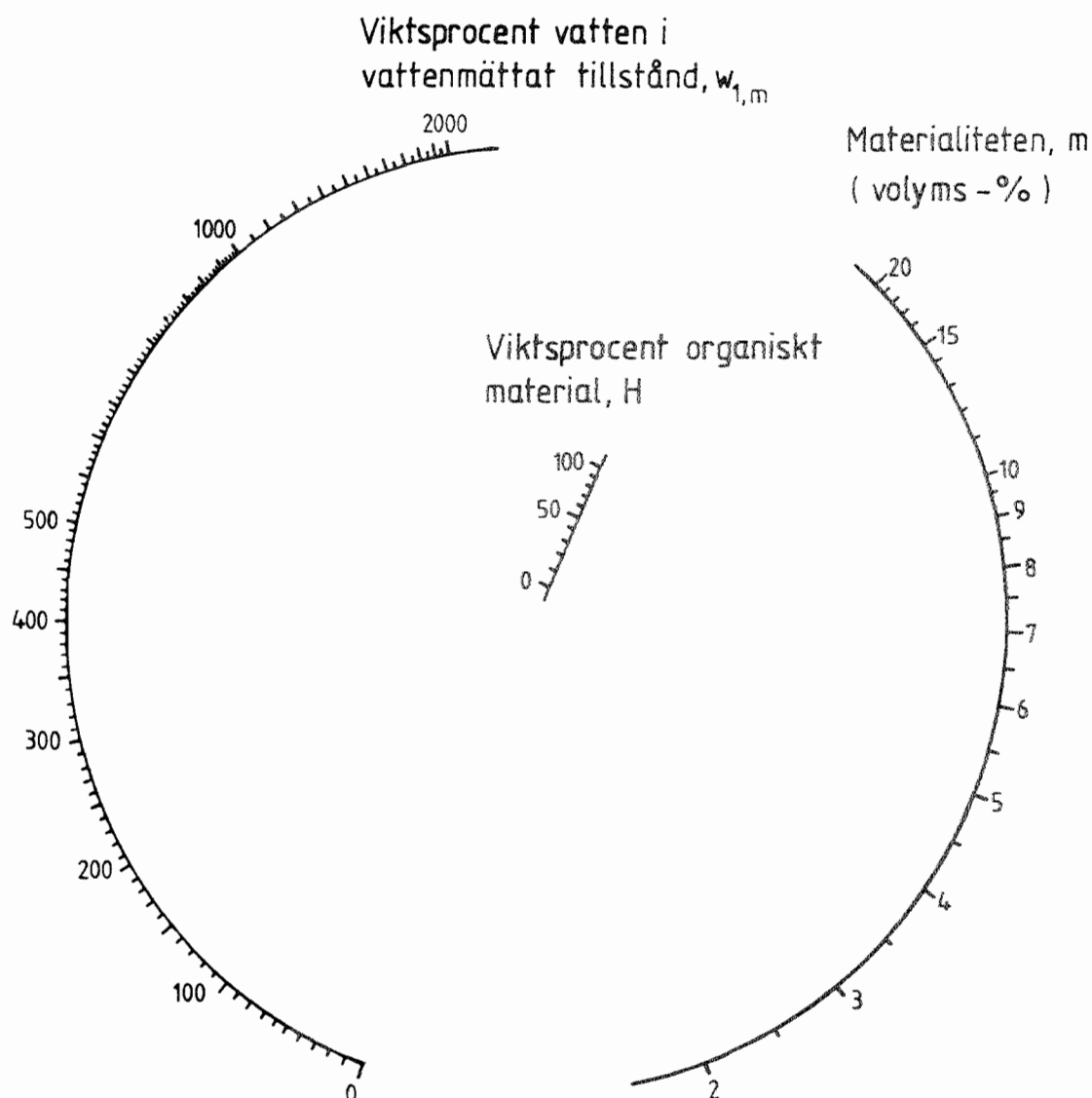
Karta över åsträckan
Blankaström-Ryningsnäs
(med Lilla Bölo-området).
Map of the river between
Blankaström and Ryningsnäs
(including Lilla Bölo
area).



Figur 11.

Diagram över några mark-
fysikaliska karaktäris-
tika från provpunkt
2H:210 inom Lilla Bölo-
området (1983).

Diagram of some soil
physical characteristics
from sampling site
2H:210 in the Lilla Bölo
area.

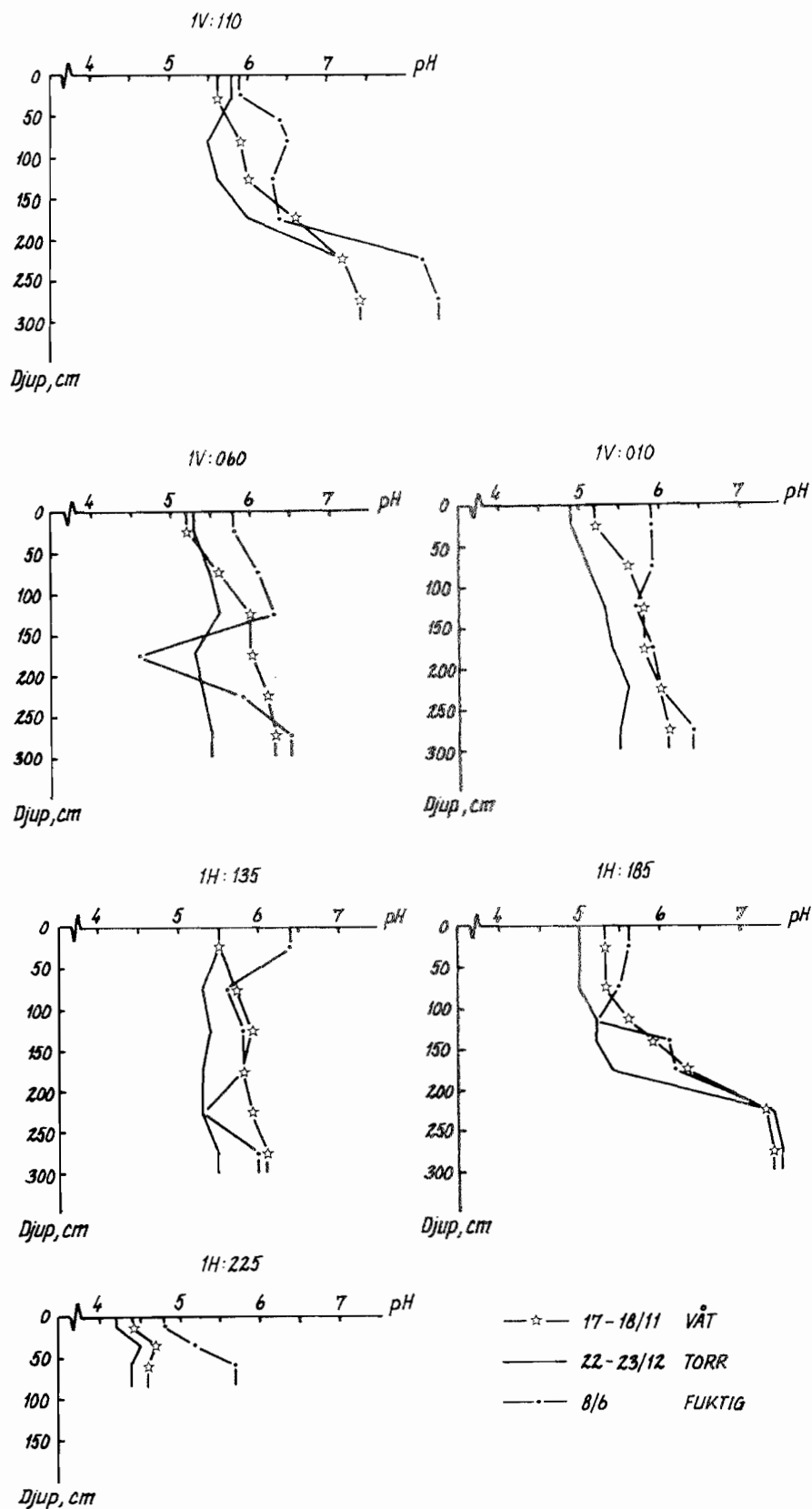


Figur 12.

Nomogram för bestämning av materialiteten, m , från kända värden $w_{1,m}$ och H på viktsprocent vatten i mättat tillstånd resp. viktsprocent organiskt material. De kända värdena $w_{1,m}$ och H sammanbindes med en rät linje. I förlängningen av denna kan m (i volymprocent torrsustans) avläsas. (Efter de Glopper, 1972)

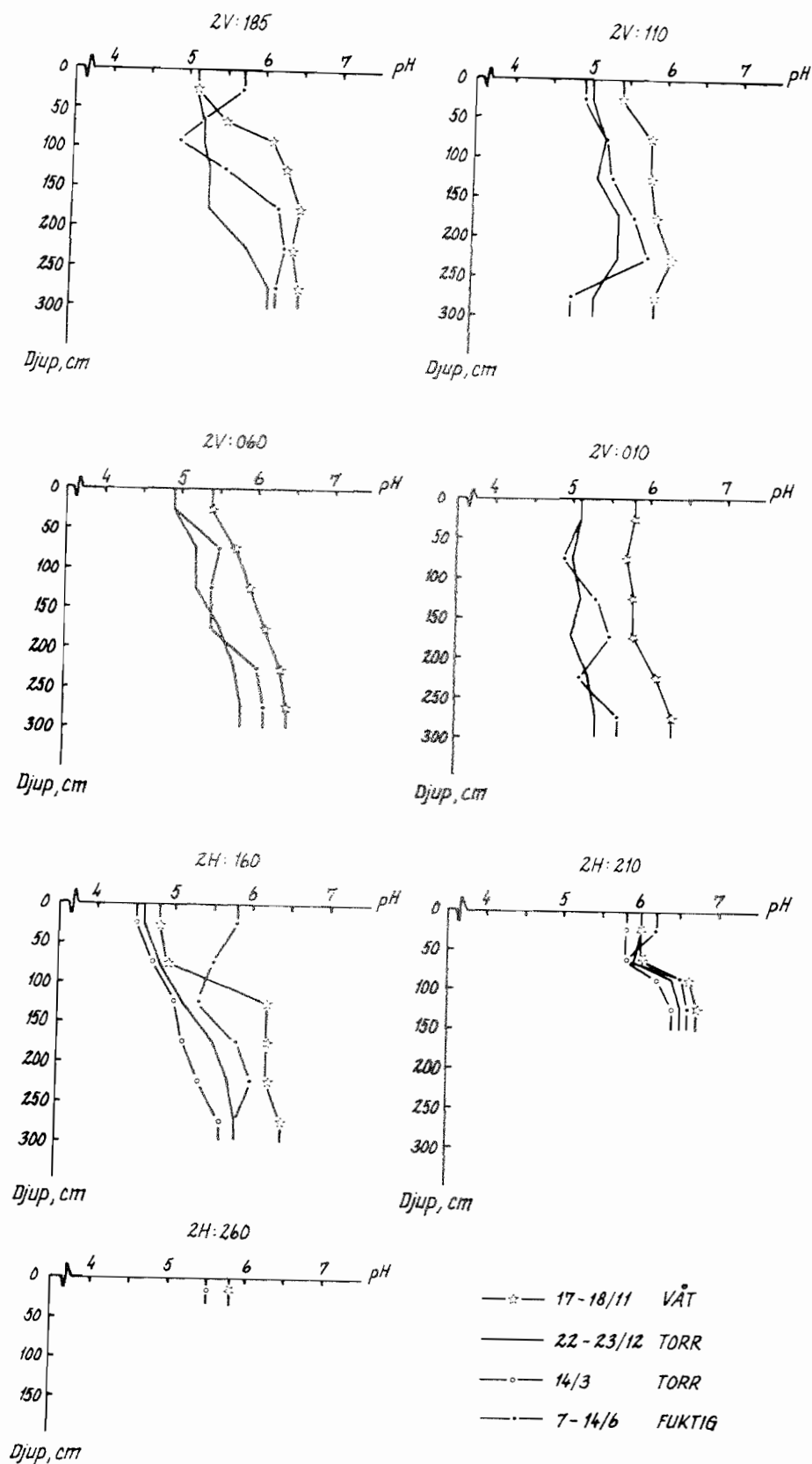
Nomogram for determination of volume of solids (m ; %vol. of dry matter) from known values of saturation moisture content ($w_{1,m}$; %wt) and organic matter content (H ; %wt).

Known values of $w_{1,m}$ and H are connected by a straight line which can be extrapolated to give a value of m . (After de Glopper, 1972)



Figur 13. pH-värden i markprofilerna på de olika provplatserna längs undersökningslinje 1 vid Lilla Bölö.

Soil pH values at the different sampling sites along sampling line 1 in Lilla Bölö area.



Figur 14. pH-värden i markprofilerna på de olika provplatserna längs undersökningslinje 2 vid Lilla Bölo.

Soil pH values at the different sampling sites along sampling line 2 in Lilla Bölo area.

Tabell 12. Några markfysikaliska data från de olika provplatserna vid Lilla Bölö
Soil physical data from sampling sites in Lilla Bölö area

Prov- punkt	Skikt- gränser (m)	Kompakt- densitet (kg/m ³)	Torr skrym- densitet (kg/m ³)	Vattenm. skrym- densitet (kg/m ³)	Glöd- nings- förlust (vikts-%)	Porosi- tet (vol-%)	Jordart T: torvjord G: gyttjeh. jord M: mineraljord
<u>1V:110</u>	0-0,50	1990	400	1300	22	80	G
	0,50-0,60	2000	700	1900	10	65	G
	0,60-1,00	2660	1500	2000	2	45	M
	1,00-1,50	(2600)	1400	2000	2	45	M
	1,50-2,00		1400	2000	2	45	M
	2,00-2,50		1300	1900	3	50	M
	2,50-3,00		1400	1900	3	45	M
	3,00-4,00			(2000)			(M)
<u>1V:060</u>	0-0,50	2230	300	1100	17	90	G
	0,50-1,00	2090	300	1300	14	90	G
	1,00-1,50	(2200)	400	1400	9	80	G
	1,50-2,00		400	1300	11	80	G
	2,00-2,50		600	1500	3	70	G
	2,50-3,00		1000	1700	2	60	M
	3,00-4,00			(1800)			(M)
<u>1V:010</u>	0-0,50	2180	200	1000	18	90	G
	0,50-1,00	2180	200	1300	16	90	G
	1,00-1,50	(2200)	300	1200	12	85	G
	1,50-2,00		400	1400	10	80	G
	2,00-2,50		600	1400	5	70	G
	2,50-3,00		700	1500	5	70	G
	3,00-4,00			(1600)			(G)
<u>1H:135</u>	0-0,50	1850	200	1200	42	90	T
	0,50-1,00	2110	300	1200	16	85	G
	1,00-1,50	(2200)	300	1300	13	85	G
	1,50-2,00		300	1300	11	85	G
	2,00-2,50		400	1300	10	80	G
	2,50-3,00		500	1400	8	80	G
	3,00-4,00			(1600)			(G)
<u>1H:185</u>	0-0,50	1700	300		70	85	T
	0,50-1,00	2030	300		18	85	G
	1,00-1,25		400		15	80	G
	1,25-1,50		1200		2	55	M
	1,50-2,00		1000		3	60	M
	2,00-2,50		1300		3	50	M
	2,50-3,00		1400		2	45	M
<u>1H:225</u>	0-0,25	1680			69		T
	0,25-0,45	2120			22		T/M
	>0,45				3		M

Tabell 12. forts.
cont.

Prov- punkt	Skikt- gränser (m)	Kompakt- densitet (kg/m ³)	Torr skrym- densitet (kg/m ³)	Vattenm. skrym- densitet (kg/m ³)	Glöd- nings- förlust (vikts-%)	Porosi- tet (vol-%)	Jordart T: torvjord G: gyttjeh. jord M: mineraljord
<u>2V:185</u>	0-0,50	2000	400	1300	28	80	G
	0,50-0,82	2220	500	1600	12	80	G
	0,82-1,00	2530	600	1500	6	75	G
	1,00-1,50	(2600)	1200	1800	2	55	M
	1,50-2,00		1400	2300	1	45	M
	2,00-2,50		1400	2000	2	45	M
	2,50-3,00		1400	2000	2	45	M
	3,00-4,00			(2000)			(M)
<u>2V:110</u>	0-0,50	2130	200	1100	21	90	G
	0,50-1,00	2170	300	1200	14	90	G
	1,00-1,50	(2200)	300	1200	11	85	G
	1,50-2,00		500	1400	7	75	G
	2,00-2,50		500	1400	7	75	G
	2,50-3,00		200	1300	36	80	G
	3,00-4,00			(1600)			(G)
<u>2V:060</u>	0-0,50	2130	300	1200	18	85	G
	0,50-1,00	2120	300	1200	14	85	G
	1,00-1,50	(2200)	300	1200	11	85	G
	1,50-2,00		400	1300	8	80	G
	2,00-2,50		600	1500	6	75	G
	2,50-3,00		700	1600	4	70	G
	3,00-4,00			(1700)			(G)
<u>2V:010</u>	0-0,50	2190	300	1100	18	80	G
	0,50-1,00	2200	200	1200	14	90	G
	1,00-1,50	(2200)	200	1200	13	90	G
	1,50-2,00		300	1200	10	85	G
	2,00-2,50		400	1400	9	80	G
	2,50-3,00		500	1400	8	75	G
	3,00-4,00			(1500)			(G)
<u>2H:160</u>	0-0,50	1960	300	1400	23	85	G
	0,50-1,00	2160	400	1400	14	80	G
	1,00-1,50	(2200)	1000	1800	4	60	M
	1,50-2,00		1400	1900	2	45	M
	2,00-2,50		1300	1900	2	50	M
	2,50-3,00		1400	2000	2	45	M
	3,00-4,00			(2000)			(M)
<u>2H:210</u>	0-0,50	1940	400		40	80	T
	0,50-0,74	2040	400		47	80	T
	0,74-1,00		1000		4	60	M
<u>2H:260</u>	0-0,28	1850			46		T

Tabell 13. Sammanfattning av hopsjunkningsberäkningarnas resultat
Summary of results from calculation of subsidence

$$\begin{aligned}
 S_{h,i} &= k_i \cdot z_d \cdot \Delta d_i \cdot d_h^{0,707} = \\
 &= 0,01 \cdot (5,0 + \rho_{s,i} / \rho_{t,i}) \cdot 1,0 \cdot \Delta d_i \cdot 1,2^{0,707} \approx \\
 &\approx 0,0114 \cdot (5,0 + \rho_{s,i} / \rho_{t,i}) \cdot \Delta d_i
 \end{aligned}$$

Prov- punkt	Dellagrens		$\rho_{s,i}$ (kg/m ³)	$\rho_{t,i}$ (kg/m ³)	$\Delta S_{h,i}$ (m)	$\Sigma \Delta S_{h,i}$ (m)
	gränser (m)	tjocklek, Δd_i (m)				
<u>1V:110</u>	0-0,50	0,50	1990	400	0,057	0,113*)
	0,50-0,60	0,10	2000	700	0,009	
	0,60-1,00	0,40	2660	1500	0,031*)	
	1,00-1,20	0,20	2600	1400	0,016*)	
<u>1V:060</u>	0-0,50	0,50	2230	300	0,071	0,163
	0,50-1,00	0,50	2090	300	0,068	
	1,00-1,20	0,20	2200	400	0,024	
<u>1V:010</u>	0-0,50	0,50	2180	200	0,091	0,210
	0,50-1,00	0,50	2180	200	0,091	
	1,00-1,20	0,20	2200	300	0,028	
<u>1H:135</u>	0-0,50	0,50	1850	200	0,081	0,178
	0,50-1,00	0,50	2110	300	0,069	
	1,00-1,20	0,20	2200	300	0,028	
<u>2V:185</u>	0-0,50	0,50	2000	400	0,057	0,126*)
	0,50-0,82	0,32	2200	500	0,034	
	0,82-1,00	0,18	2530	600	0,019	
	1,00-1,20	0,20	2600	1200	0,016*)	
<u>2V:110</u>	0-0,50	0,50	2130	200	0,089	0,187
	0,50-1,00	0,50	2170	300	0,070	
	1,00-1,20	0,20	2200	300	0,028	
<u>2V:060</u>	0-0,50	0,50	2130	300	0,069	0,166
	0,50-1,00	0,50	2120	300	0,069	
	1,00-1,20	0,20	2200	300	0,028	
<u>2V:010</u>	0-0,50	0,50	2190	300	0,070	0,197
	0,50-1,00	0,50	2200	200	0,091	
	1,00-1,20	0,20	2200	200	0,036	
<u>2H:160</u>	0-0,50	0,50	1960	300	0,066	0,142*)
	0,50-1,00	0,50	2160	400	0,060	
	1,00-1,20	0,20	2200	1000	0,016*)	

*) Mineraljord; det beräknade hopsjunkningsvärdet är möjligen för högt
Mineral soil; calculated subsidence is perhaps too high

Tabell 14a. Successivt kumulerade effektivtryck i profilerna vid provpunkter längs linje 1 vid Lilla Bölö före och efter grundvattenståndssänkning
Successively accumulated effective pressure in soil at sampling points on line 1 in Lilla Bölö area before and after lowering of groundwater level

Prov- punkt	Dellagrens		ρ_m (kg/m ³)	Eff.tryck (Pa) av dellagret på underlaget		Kum. eff.tryck (Pa) vid del- lagrets underk.	
	gränser (m)	tjocklek, Δd_i (m)		före s.	efter s.	före s.	efter s.
<u>1V:110</u>	0-0,50	0,50	1300	150·g	650·g	150·g	650·g
	0,50-0,60	0,10	1900	90·g	190·g	240·g	840·g
	0,60-1,00	0,40	2000	400·g	800·g	640·g	1640·g
	1,00-1,20	0,20	2000	200·g	400·g	840·g	2040·g
	1,20-1,50	0,30	2000	300·g	300·g	1140·g	2340·g
	1,50-2,00	0,50	2000	500·g	500·g	1640·g	2840·g
	2,00-2,50	0,50	1900	450·g	450·g	2090·g	3290·g
	2,50-3,00	0,50	1900	450·g	450·g	2540·g	3740·g
	3,00-4,00	1,00	2000	1000·g	1000·g	3540·g	4740·g
	0-0,50	0,50	1100	50·g	550·g	50·g	550·g
	0,50-1,00	0,50	1300	150·g	650·g	200·g	1200·g
	1,00-1,20	0,20	1400	80·g	280·g	280·g	1480·g
<u>1V:060</u>	1,20-1,50	0,30	1400	120·g	120·g	400·g	1600·g
	1,50-2,00	0,50	1300	150·g	150·g	550·g	1750·g
	2,00-2,50	0,50	1500	250·g	250·g	800·g	2000·g
	2,50-3,00	0,50	1700	350·g	350·g	1150·g	2350·g
	3,00-4,00	1,00	1800	800·g	800·g	1950·g	3150·g
	0-0,50	0,50	1000	0	500·g	0	500·g
	0,50-1,00	0,50	1300	150·g	650·g	150·g	1150·g
	1,00-1,20	0,20	1200	40·g	240·g	190·g	1390·g
	1,20-1,50	0,30	1200	60·g	60·g	250·g	1450·g
	1,50-2,00	0,50	1400	200·g	200·g	450·g	1650·g
	2,00-2,50	0,50	1400	200·g	200·g	650·g	1850·g
	2,50-3,00	0,50	1500	250·g	250·g	900·g	2100·g
<u>1V:010</u>	3,00-4,00	1,00	1600	600·g	600·g	1500·g	2700·g
	0-0,50	0,50	1200	100·g	600·g	100·g	600·g
	0,50-1,00	0,50	1200	100·g	600·g	200·g	1200·g
	1,00-1,20	0,20	1300	60·g	260·g	260·g	1460·g
	1,20-1,50	0,30	1300	90·g	90·g	350·g	1550·g
	1,50-2,00	0,50	1300	150·g	150·g	500·g	1700·g
	2,00-2,50	0,50	1300	150·g	150·g	650·g	1850·g
	2,50-3,00	0,50	1400	200·g	200·g	850·g	2050·g
	3,00-4,00	1,00	1600	600·g	600·g	1450·g	2650·g
	0-0,50	0,50	1200	100·g	600·g	100·g	600·g
	0,50-1,00	0,50	1200	100·g	600·g	200·g	1200·g
	1,00-1,20	0,20	1300	60·g	260·g	260·g	1460·g
	1,20-1,50	0,30	1300	90·g	90·g	350·g	1550·g
<u>1H:135</u>	1,50-2,00	0,50	1300	150·g	150·g	500·g	1700·g
	2,00-2,50	0,50	1300	150·g	150·g	650·g	1850·g
	2,50-3,00	0,50	1400	200·g	200·g	850·g	2050·g
	3,00-4,00	1,00	1600	600·g	600·g	1450·g	2650·g

Tabell 14b. Successivt kumulerade effektivtryck i profilerna vid provpunkter längs linje 2 vid Lilla Bölö före och efter grundvattenståndssänkning

Prov- punkt	Dellagrens		ρ_m (kg/m ³)	Eff.tryck (Pa) av dellagret på underlaget		Kum. eff.tryck (Pa) vid del- lagrets underk.	
	gränser (m)	tjocklek, Δd_i (m)		före s.	efter s.	före s.	efter s.
<u>2V:185</u>	0-0,50	0,50	1300	150·g	650·g	150·g	650·g
	0,50-0,82	0,32	1600	192·g	512·g	342·g	1162·g
	0,82-1,00	0,18	1500	90·g	270·g	432·g	1432·g
	1,00-1,20	0,20	1800	160·g	360·g	592·g	1792·g
	1,20-1,50	0,30	1800	240·g	240·g	832·g	2032·g
	1,50-2,00	0,50	2300	650·g	650·g	1482·g	2682·g
	2,00-2,50	0,50	2000	500·g	500·g	1982·g	3182·g
	2,50-3,00	0,50	2000	500·g	500·g	2482·g	3682·g
	3,00-4,00	1,00	2000	1000·g	1000·g	3482·g	4682·g
<u>2V:110</u>	0-0,50	0,50	1100	50·g	550·g	50·g	550·g
	0,50-1,00	0,50	1200	100·g	600·g	150·g	1150·g
	1,00-1,20	0,20	1200	40·g	240·g	190·g	1390·g
	1,20-1,50	0,30	1200	60·g	60·g	250·g	1450·g
	1,50-2,00	0,50	1400	200·g	200·g	450·g	1650·g
	2,00-2,50	0,50	1400	200·g	200·g	650·g	1850·g
	2,50-3,00	0,50	1300	150·g	150·g	800·g	2000·g
	3,00-4,00	1,00	1600	600·g	600·g	1400·g	2600·g
<u>2V:060</u>	0-0,50	0,50	1200	100·g	600·g	100·g	600·g
	0,50-1,00	0,50	1200	100·g	600·g	200·g	1200·g
	1,00-1,20	0,20	1200	40·g	240·g	240·g	1440·g
	1,20-1,50	0,30	1200	60·g	60·g	300·g	1500·g
	1,50-2,00	0,50	1300	150·g	150·g	450·g	1650·g
	2,00-2,50	0,50	1500	250·g	250·g	700·g	1900·g
	2,50-3,00	0,50	1600	300·g	300·g	1000·g	2200·g
	3,00-4,00	1,00	1700	700·g	700·g	1700·g	2900·g
<u>2V:010</u>	0-0,50	0,50	1100	50·g	550·g	50·g	550·g
	0,50-1,00	0,50	1200	100·g	600·g	150·g	1150·g
	1,00-1,20	0,20	1200	40·g	240·g	190·g	1390·g
	1,20-1,50	0,30	1200	60·g	60·g	250·g	1450·g
	1,50-2,00	0,50	1200	100·g	100·g	350·g	1550·g
	2,00-2,50	0,50	1400	200·g	200·g	550·g	1750·g
	2,50-3,00	0,50	1400	200·g	200·g	750·g	1950·g
	3,00-4,00	1,00	1500	500·g	500·g	1250·g	2450·g
<u>2H:160</u>	0-0,50	0,50	1400	200·g	700·g	200·g	700·g
	0,50-1,00	0,50	1400	200·g	700·g	400·g	1400·g
	1,00-1,20	0,20	1800	160·g	360·g	560·g	1760·g
	1,20-1,50	0,30	1800	240·g	240·g	800·g	2000·g
	1,50-2,00	0,50	1900	450·g	450·g	1250·g	2450·g
	2,00-2,50	0,50	1900	450·g	450·g	1700·g	2900·g
	2,50-3,00	0,50	2000	500·g	500·g	2200·g	3400·g
	3,00-4,00	1,00	2000	1000·g	1000·g	3200·g	4400·g

Tabell 15. Sammanfattning av kompressionsberäkningarna med koefficienten c lika med 11 för gyttjehaltig jord och 15 för mineraljord
Summary of calculation of consolidation using $c=11$ for gyttja soils and $c=15$ for mineral soils

Prov- punkt	Dellagrens		β_i (Pa/m)	Eff.trycket (Pa) före sänkning		Eff.trycket (Pa) efter sänkning		$\Delta S_{k,i}$	$S_k =$ $\sum \Delta S_{k,i}$
	gränser	Δd_i		överk. ($\bar{\sigma}_{11,i}$)	underk. ($\bar{\sigma}_{12,i}$)	överk. ($\bar{\sigma}_{21,i}$)	underk. ($\bar{\sigma}_{22,i}$)		
<u>1V:110</u>	1,2-1,5	0,3	1000·g	840·g	1140·g	2040·g	2340·g	0,016	0,090
	1,5-2,0	0,5	1000·g	1140·g	1640·g	2340·g	2840·g	0,021	
	2,0-2,5	0,5	900·g	1640·g	2090·g	2840·g	3290·g	0,017	
	2,5-3,0	0,5	900·g	2090·g	2540·g	3290·g	3740·g	0,014	
	3,0-4,0	1,0	1000·g	2540·g	3540·g	3740·g	4740·g	0,022	
<u>1V:060</u>	1,2-1,5	0,3	400·g	280·g	400·g	1480·g	1600·g	0,041	0,211
	1,5-2,0	0,5	300·g	400·g	550·g	1600·g	1750·g	0,057	
	2,0-2,5	0,5	500·g	550·g	800·g	1750·g	2000·g	0,047	
	2,5-3,0	0,5	700·g	800·g	1150·g	2000·g	2350·g	0,027	
	3,0-4,0	1,0	800·g	1150·g	1950·g	2350·g	3150·g	0,039	
<u>1V:010</u>	1,2-1,5	0,3	200·g	190·g	250·g	1390·g	1450·g	0,051	0,279
	1,5-2,0	0,5	400·g	250·g	450·g	1450·g	1650·g	0,068	
	2,0-2,5	0,5	400·g	450·g	650·g	1650·g	1850·g	0,053	
	2,5-3,0	0,5	500·g	650·g	900·g	1850·g	2100·g	0,043	
	3,0-4,0	1,0	600·g	900·g	1500·g	2100·g	2700·g	0,064	
<u>1H:135</u>	1,2-1,5	0,3	300·g	260·g	350·g	1460·g	1550·g	0,044	0,266
	1,5-2,0	0,5	300·g	350·g	500·g	1550·g	1700·g	0,061	
	2,0-2,5	0,5	300·g	500·g	650·g	1700·g	1850·g	0,051	
	2,5-3,0	0,5	400·g	650·g	850·g	1850·g	2050·g	0,044	
	3,0-4,0	1,0	600·g	850·g	1450·g	2050·g	2650·g	0,066	
<u>2V:185</u>	1,2-1,5	0,3	800·g	592·g	832·g	1792·g	2032·g	0,020	0,099
	1,5-2,0	0,5	1300·g	832·g	1482·g	2032·g	2682·g	0,024	
	2,0-2,5	0,5	1000·g	1482·g	1982·g	2682·g	3182·g	0,018	
	2,5-3,0	0,5	1000·g	1982·g	2482·g	3182·g	3682·g	0,014	
	3,0-4,0	1,0	1000·g	2482·g	3482·g	3682·g	4682·g	0,023	
<u>2V:110</u>	1,2-1,5	0,3	200·g	190·g	250·g	1390·g	1450·g	0,051	0,284
	1,5-2,0	0,5	400·g	250·g	450·g	1450·g	1650·g	0,068	
	2,0-2,5	0,5	400·g	450·g	650·g	1650·g	1850·g	0,053	
	2,5-3,0	0,5	300·g	650·g	800·g	1850·g	2000·g	0,044	
	3,0-4,0	1,0	600·g	800·g	1400·g	2000·g	2600·g	0,068	
<u>2V:060</u>	1,2-1,5	0,3	200·g	240·g	300·g	1440·g	1500·g	0,046	0,263
	1,5-2,0	0,5	300·g	300·g	450·g	1500·g	1650·g	0,066	
	2,0-2,5	0,5	500·g	450·g	700·g	1650·g	1900·g	0,052	
	2,5-3,0	0,5	600·g	700·g	1000·g	1900·g	2200·g	0,040	
	3,0-4,0	1,0	700·g	1000·g	1700·g	2200·g	2900·g	0,059	
<u>2V:010</u>	1,2-1,5	0,3	200·g	190·g	250·g	1390·g	1450·g	0,051	0,303
	1,5-2,0	0,5	200·g	250·g	350·g	1450·g	1550·g	0,073	
	2,0-2,5	0,5	400·g	350·g	550·g	1550·g	1750·g	0,059	
	2,5-3,0	0,5	400·g	550·g	750·g	1750·g	1950·g	0,048	
	3,0-4,0	1,0	500·g	750·g	1250·g	1950·g	2450·g	0,072	
<u>2H:160</u>	1,2-1,5	0,3	800·g	560·g	800·g	1760·g	2000·g	0,020	0,107
	1,5-2,0	0,5	900·g	800·g	1250·g	2000·g	2450·g	0,026	
	2,0-2,5	0,5	900·g	1250·g	1700·g	2450·g	2900·g	0,020	
	2,5-3,0	0,5	1000·g	1700·g	2200·g	2900·g	3400·g	0,016	
	3,0-4,0	1,0	1000·g	2200·g	3200·g	3400·g	4400·g	0,025	

Tabell 16. Total markytesjunkning, S_g , på undersökningsområdet vid Lilla Bölö, dvs summan av de av hopsjunkning och kompression förorsakade sjunkningarna, enligt tabellerna 13 och 15

Total subsidence, S_g (sum of subsidence due to shrinkage and compression), in the experimental area at Lilla Bölö, according to Tables 13 and 15

Skikt- gränser (m)	Hopsjunkning + kompression (m) /c=11 resp. 15/	Hopsjunkning + kompression (m) /c=6 resp. 9/	Hopsjunkning + kompression (m) /c=11 resp. 15/	Hopsjunkning + kompression (m) /c=6 resp. 9/
Provpunkt: <u>1V:110</u>			Provpunkt: <u>2V:185</u>	
0-1,2	0,113	0,113	0,126	0,126
1,2-4,0	<u>0,090</u>	<u>0,150</u>	<u>0,099</u>	<u>0,164</u>
0-4,0	0,20	0,26	0,23	0,29
Provpunkt: <u>1V:060</u>			Provpunkt: <u>2V:110</u>	
0-1,2	0,163	0,163	0,187	0,187
1,2-4,0	<u>0,211</u>	<u>0,377</u>	<u>0,284</u>	<u>0,522</u>
0-4,0	0,37	0,54	0,47	0,71
Provpunkt: <u>1V:010</u>			Provpunkt: <u>2V:060</u>	
0-1,2	0,210	0,210	0,166	0,166
1,2-4,0	<u>0,279</u>	<u>0,510</u>	<u>0,263</u>	<u>0,481</u>
0-4,0	0,49	0,72	0,43	0,65
Provpunkt: <u>1H:135</u>			Provpunkt: <u>2V:010</u>	
0-1,2	0,178	0,178	0,197	0,197
1,2-4,0	<u>0,266</u>	<u>0,487</u>	<u>0,303</u>	<u>0,556</u>
0-4,0	0,44	0,67	0,50	0,75
			Provpunkt: <u>2H:160</u>	
0-1,2			0,142	0,142
1,2-4,0			<u>0,107</u>	<u>0,178</u>
0-4,0			0,25	0,32

Beräkningsexempel med Hallakorpi's formel:*Example of a calculation using Hallakorpi's formula:*

Total markytesjunkning beräknad med tillämpning av formel (11)

(Utan samband med undersökningsområdet vid Lilla Bölö)

*Total subsidence calculated using formula 11**(Does not refer to the experimental area at Lilla Bölö)*

$$S_{s,i} = a \cdot (0,08 \cdot \Delta d_{t,i} + 0,066)$$

$$S_s = \sum \Delta S_{s,i}$$

$\Delta S_{s,i}$: Total minskning av tjockleken av
torvdellagret "i" (m)

a: Koefficient (-)

$\Delta d_{t,i}$: Initial tjocklek av torvdellager "i" (m)

S_s : Summa total markytesjunkning (m)

Lager med olika konsistens medför olika värden på koefficienten, a. Varje sådant lager räknas separat. För dellager som ej når upp till markytan gäller att dess del av markytesjunkningen kan erhållas (enligt DIN, 1973) på så sätt att man först beräknar vad markytesjunkningen skulle blivit om det aktuella lagret gått ända upp till ytan samt därefter drar ifrån överliggande torvlagers andel av det först erhållna beloppet. Nedanstående exempel (utan samband med undersökningsområdet vid Lilla Bölö!) från en 5 meter djup, treskiktad myr visar beräkningsgången för de olika lagren:

Lagergränser (m)	Konsistens	a-värde	Beräkning av $\Delta S_{s,i}$
0 -1,5	ganska fast	1,4	$\Delta S_{s,1} = 1,4 \cdot (0,080 \cdot 1,5 + 0,066) = 0,26$
1,5-3,0	ganska lucker	2,0	$\Delta S_{s,2} = 2,0 \cdot (0,080 \cdot 3,0 + 0,066) -$ $- 2,0 \cdot (0,080 \cdot 1,5 + 0,066) = 0,24$
3,0-5,0	lucker	2,85	$\Delta S_{s,3} = 2,85 \cdot (0,080 \cdot 5,0 + 0,066) -$ $- 2,85 \cdot (0,080 \cdot 3,0 + 0,066) = 0,46$
Summa total markytesjunkning			<u>0,96 m</u>

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien.

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP.
AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. RAPPORTER.

- 127 Erpenbeck, J. M. 1982. Irrigation Scheduling. A review of techniques and adaptation of the USDA Irrigation Scheduling Computer Program for Swedish conditions. 135 s.
- 128 Berglund, K. & Björck, R. 1982. Om skördeskadorna i Värmlands län 1981. S. 1-8
Linnér, H. 1982. Växtnäringsbevattnings. S. 9-16
Eriksson, J. 1982. A field method to check subsurface-drainage efficiency. S. 17-23
- 129 Karlsson, I. 1982. Soil moisture investigation and classification of seven soils in the Mbeya region, Tanzania. 56 s.
- 130 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del V: Skaraborgs län. 134 s.
- 131 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VI: Örebro och Västmanlands län. 83 s.
- 132 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del I: Ultunajordar. 125 s.
- 133 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VII: Uppsala län. 140 s.
- 134 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VIII: Stockholms, Södermanlands och Östergötlands län. 122 s.
- 135 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del IX: Hallands, Jönköpings, Kronobergs, Kalmar och Gotlands län. 104 s.
- 136 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del X: Malmöhus och Kristianstads län. 116 s.
- 137 Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del XI: Kristianstads län. 110 s.

- 138 Berglund, G., Huhtasaari, C, & Ingevall, A. 1984. Dränering av jordar med rostproblem. S. 1-20
Ingevall, A. 1984. Dränering av tryckvatten. S. 21-36.
- 139 Persson, R. 1984. Vattenmagasin för bevattning. 57 + 5 s.
- 140 Ingevall, A. 1984. Beräkning av lerhalt från vattenhaltsdata. En jämförelse mellan hygroskopicitets- och vissningsgränsdata som underlag för översiktlig jordartsbestämning. 61 s.
- 141 Alinder, S. 1984. Alternativa bevattningsformer. 1: Bevattningsramp. 29 s.
- 142 Linnér, H. 1984. Markfuktighetens inflytande på evapotranspiration, tillväxt, näringsupptagning, avkastning och kvalitet hos potatis (*Solanum Tuberosum* L.). 153 s.
- 143 McAfee, M. 1984. Drainage of Peat Soils. A literature review. 38 s.
- 144 Messing, I. 1985. Inverkan av tung körning på mark vid två tidpunkter under vårperioden. En markfysikalisk studie av en lerjord i Rvingehedsområdet. 20 s.
- 145 Jonsson, B. 1985. Organiska och syntetiska fibermaterial som dräneringsfilter. 46 s.
- 146 Ericson, L., Fabricius, M., Danielsson, E., Hultman, B., Juto, H. och Huhtasaari, C. 1985. De odlade jordarna i Norrbottens och Västerbottens län. 82 s.
- 147 McAfee, M. 1985. The Rise and Fall of Bälunge Mossar. 76 s.
- 148 Johansson, W., Gustafsson, E.-L. & McAfee, M. 1985. Description of physical properties of twelve cultivated soils. 64 s.
- 149 Kreuger, J. 1986. Kemisk vattenkvalitet vid bevattning. S. 9-59.
Håkansson, A. & Kreuger, J. 1986. Vägledning för bedömning av kemisk vattenkvalitet vid bevattning. S. 61-78.
- 150 Alinder, S. 1986. Alternativa bevattningsformer. 2: Reglering av grundvattennivån. 65 s.
- 151 Edling, P. 1986. Soil Air. Volume and Gas Exchange Mechanisms. 132 s.
- 152 Andersson, L. & Gervais, P. 1987. Marktypskartering i NV Skåne med satellit fjärranalys. 29 s. (Institutionen för biometri och skogsindelning, Avd. för skoglig fjärranalys, Box 7079, 750 07 Uppsala)
- 153 Lindström, J. & McAfee, M. 1987. Air and water movement in covers for mine waste. 56 s.
- 154 Bjerketorp, A. & Axelson, U. 1987. Markytesjunkning efter avvattning. Litteratur- och fältstudier i anslutning till ett område i Emådalen. 67 s.
- 155 Gustafsson, E.-L. 1987. Marktäckning. Effekter på olika jordtyper. 59 s.

Denna serie rapporter utges av Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Serien innehåller sådana forsknings- och försöksredogörelser samt andra uppsatser som bedöms vara lämpade för mer allmän spridning. Uppsatser av huvudsakligen internt intresse publiceras i serien Avdelningsmeddelanden. Tidigare nummer i rapportserien kan i mån av tillgång levereras från avdelningen.

This series of Reports is produced by the Division of Agricultural Hydrotechnics, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. The series consists of reports on research and field trials and of articles or papers considered to be of general interest. Articles of mainly internal interest are published in a series of Divisional Communications (Avdelningsmeddelande). Earlier issues in the Report series can be obtained from the Division of Agricultural Hydrotechnics (subject to availability).

DISTRIBUTION:

Sveriges Lantbruksuniversitet

Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

S-750 07 UPPSALA, Sverige

Tfn 018/67 11 65, 018/67 11 81
